

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Đurak

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

IZMJENJIVAČ TOPLINE

VLAŽNI ZRAK/VODA – SUŠAČ ZRAKA

Voditelj rada:

Prof.dr.sc. Ivanka Boras dipl.ing

Tomislav Đurak

Prof.dr.sc. Srećko Švaić dipl.ing

Zagreb, 2010.

Sažetak

U okviru diplomskog rada prikazane su osnove prijelaza topline i pada tlaka u izmjenjivaču. Za zadanu konstrukciju i zadane ulazne parametre izračunati je učin aparata i pad tlaka u njemu. S obzirom na nepoznate izlazne parametre postupak proračun učina proveden je iterativno. Proračun prijelaza topline izveden je prema Gnielinskom, a proračun pada tlaka prema Gaddisu. Pomoću programa „Visual Vessel Design“ provjerena je čvrstoća pojedinih dijelova aparata prema normi HRN EN 13445.

Sadržaj

SAŽETAK	I
SADRŽAJ	II
POPIS SLIKA	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE.....	X
IZJAVA	XI
ZAHVALA	XI
1 UVOD	1
2 TEORIJSKE OSNOVE I PRORAČUN TRANSPORTA TOPLINE U IZMJENJIVAČU.....	3
2.1 PRIJELAZ TOPLINE U PLAŠTU IZMJENJIVAČA	4
2.2 PRIJELAZ TOPLINE U CIJEVIMA IZMJENJIVAČA	11
3 TEORIJSKE OSNOVE I PRORAČUNA PADA TLAKU KOD IZMJENJIVAČA S PREGRADAMA U PLAŠTU	12
3.1 PAD TLAKA U PLAŠTU IZMJENJIVAČA.....	12
3.2 PAD TLAKA U CIJEVNOM SNOPU	17
4 TEHNIČKI OPIS PROCESA HLAĐENJA.....	18
5 PRORAČUN UČINA ZA OBA IZMJENJIVAČA	19
5.1 PRVI STUPANJ (ZRAK-ZRAK)	20
5.1.1 Proračun prijelaza topline u plaštu izmjenjivača I. stupnja:	21
5.1.2 Proračun prijelaza topline u cijevima izmjenjivača I. stupnja:.....	25
5.1.3 Proračun učina prvog stupnja:.....	26
5.2 DRUGI STUPANJ (ZRAK-VODA)	28

5.2.1	Proračun prijelaza topline u plaštu izmjenjivača II. stupnja:.....	29
5.2.2	Proračun prijelaza topline u cijevima izmjenjivača II. stupnja:.....	33
5.2.3	Proračun učina drugog stupnja:.....	35
5.3	REZULTATI	37
6	PRORAČUN PADA TLAKA ZA OBA IZMJENJIVAČA.....	38
6.1	PRVI STUPANJ (ZRAK-ZRAK)	39
6.1.1	Pad tlaka u plaštu izmjenjivača prvog stupnja	40
6.1.2	Pad tlaka u cijevima izmjenjivača	46
6.2	DRUGI STUPANJ (ZRAK-VODA)	48
6.2.1	Pad tlaka u plaštu izmjenjivača drugog stupnja	49
6.2.2	Pad tlaka u cijevima izmjenjivača	55
7	PRORAČUN ČVRSTOĆE PREMA NORMI HRN EN 13445.....	57
7.1	MATERIJALI IZRADE	57
7.2	KOEFICIJENT ZAVARA	57
7.3	HIDROSTATSKI ISPITNI TLAK	57
7.4	PRORAČUN ČVRSTOĆE U „VISUAL VESSEL DESIGNU“	58
7.4.1	Proračun cilindričnog plašta prvog stupnja	58
7.4.2	Proračun najvećeg izreza cilindričnog plašta prvog stupnja.....	59
7.4.3	Proračun konusnog plašta prvog stupnja	61
7.4.5	Proračun cilindričnog plašta drugog stupnja.....	62
7.4.6	Proračun najvećeg izreza cilindričnog plašta drugog stupnja	63
7.4.7	Proračun cilindričnog plašta podnice drugog stupnja.....	65
7.4.8	Proračun ravne podnice	66
7.4.9	Proračun najvećeg izreza na ravnoj podnici	67
8	ZAKLJUČAK	68
9	LITERATURA	69

Popis slika

Slika 1. Shematski prikaz izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama u plaštu aparata	4
Slika 2. Definicija najužeg presjeka strujanja kod aparata s cijevima u plaštu.....	5
Slika 3. Izvedbe poprečno nastrujavanih snopova cijevi;	8
Slika 4. Shematski prikaz strujanja u plaštu aparata s pregradama	13
Slika 5. Shematski prikaz brtvenih traka	13
Slika 6. Shematski prikaz procesa	18

Popis oznaka

Latinične oznake	Dimenzija	Naziv
c	mm	dodatak za odstupanje dimenzija materijala
C_B	-	konstanta, za $Re < 100$ $C_B = 1,5$; za $Re > 100$ $C_B = 1,35$
c_p	J/kgK	specifični toplinski kapacitet zraka za srednju temperaturu
c_w	J/kgK	specifični toplinski kapacitet vode za srednju temperaturu
D_C	m	promjer kruga koji tangira cijevi najudaljenije od centra
D_e	mm	vanjski promjer plašta
D_{iL}	mm	unutarnji promjer veće baze konusnog plašta
D_{iS}	mm	unutarnji promjer manje baze konusnog plašta
D_s	m	promjer segmentne pregrade
D_U	m	unutarnji promjer plašta
d_b	m	promjer provrta na cijevnoj stijenci
d_{eb}	mm	hidraulički promjer segmentnog odsječka
d_h	m	hidraulički promjer segmentnog odsječka
d_u	m	unutarnji promjer cijevi
d_v	m	vanjski promjer cijevi izmjenjivača
e	m	razmak između pojedinih cijevi
e_n	mm	debljina stijenke plašta
e_{nb}	mm	debljina stijenke priključka
e_i	m	razmak između plašta aparata i vanjskih cijevi
F	-	korekcijski faktor, približno jednak 1
$F_{p,l}$	-	pomoćni faktor kod laminarnog strujanja

$F_{p,t}$	-	pomoćni faktor kod turbulentnog strujanja
f_A	-	korekcijski faktor koji uzima u obzir odstupanje između ideal. i realnog aparata
f_B	-	korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed obilaznog strujanja
f_G	-	geometrijski faktor
f_L	-	korekcijski faktor za lekažno strujanje
f_S	-	korekcijski faktor koji uzima u obzir utjecaj uzdužnog strujanja
f_S	-	korekcijski faktor položaja cijevi unutar snopa
f_Q	-	faktor koji uzima u obzir smjer izmjene topline, približno je jednak 1
H	m	visina odsječka segmentne pregrade
k	mm	hrapavosti cijevi
k_v	W/m ² K	koeficijent prolaza topline za vanjsku površinu
L	m	prestrujna duljina cijevi
L_c	mm	duljina konusnog plašta
L_{cyl}	mm	duljina cilindričnog plašta
L_i	m	duljina izmjenjivača
L_k	m	razmak između segmentne pregrade i cijevne stijenke
L_M	m	razmak između segmentnih pregrada
N_U	-	broj cijevi u uzdužnoj zoni
Nu_c	-	Nusseltov broj za poprečno nastrojano glatku cijev
Nu_l	-	Nusseltov broj pri laminarnom strujanju
Nu_t	-	Nusseltov broj pri turbulentnom strujanju
Nu_{SG}	-	Nusseltov broj za poprečno nastrojani snop glatkih cijevi

n	-	broj cijevi
Pr	-	Prandtlov broj
p	bar	tlak
Δp	N/m ²	ukupni pad tlaka
$\Delta p_{1,k}$	N/m ²	pad tlaka u jednoj od krajnjih zona
$\Delta p_{i,k}$	N/m ²	pad tlaka u jednoj od krajnjih zona idealnog aparata
$\Delta p_{i,m}$	N/m ²	pad tlaka u međuzoni idealnog aparata
Δp_{kr}	N/m ²	pad tlaka u krajnjoj zoni
Δp_m	N/m ²	pad tlaka u međuzoni
Δp_u	N/m ²	pad tlaka u uzdužnoj zoni
Δp_{pr}	N/m ²	pad tlaka u priključku
R_B	-	omjer slobodnog presjeka za obilazno strujanje i najužeg presjeka strujanja
R_C	-	omjer prstenastog presjeka i ukupnog presjeka lekažnog strujanja
Re	-	Reynoldsov broj
R_L	-	omjer ukupnog presjeka za lekažno strujanje i najužeg presjeka strujanja
R_P	-	omjer ukupnog presjeka za lekažno strujanje i presjeka za lekažno strujanje između plašta aparata i pregrade
S_B	m ²	slobodni presjek za obilazno strujanje
S_{LC}	m ²	prstenasti presjek za lekažno strujanje između cijevi i otvora
S_L	m ²	ukupni presjek za lekažno strujanje
S_{LPS}	m ²	presjek za lekažno strujanje između plašta aparata i pregrade

S_M	m^2	slobodni presjek strujanja u međuzoni
S_0	m^2	slobodni presjek plašta
S_U	m^2	slobodni presjek strujanja u uzdužnoj zoni
t_d	-	normirani dijagonalni korak cijevi
t_h	mm	dodatak zbog smanjenja debljine lima korozijom i habanjem
t_p	-	normirani poprečni korak cijevi
t_u	-	normirani uzdužni korak cijevi
q_v	m^3/s	volumenski protok
q_{vn}	m_n^3/h	protočna količina
w_{kr}	m/s	brzina medija u krajnjoj zoni
w_m	m/s	brzina medija u međuzoni
w_0	m/s	brzina strujanja u slobodnom presjeku plašta [m/s]
w_{pr}	m/s	brzina medija u priključku
w_u	m/s	brzina medija u uzdužnoj zoni
Z_B	-	broj brtvenih traka
Z_k	-	broj poprečno nastrojanih redova u krajnjoj zoni
Z_p	-	broj poprečno nastrojanih redova
Z_s	-	broj segmentnih pregrada
Z_u	-	broj poprečno nastrojanih redova
x	kg/kg	sadržaj vlage u vlažnom zraku

Grčke oznake	Dimenzija	Naziv
α	W/m ² K	koeficijent prijelaza topline
γ	°	središnji kut segmentne pregrade
$\xi_{i,k}$	-	faktor otpora idealnog aparata u krajnjoj zoni
$\xi_{i,m}$	-	faktor otpora idealnog aparata u međuzoni
ξ_p	-	ukupni faktor otpora kod poprečno nastrujanog snopa cijevi za paralelni/šahovski smještaj cijevi
ξ_{pr}	-	faktor otpora priključka aparata
$\xi_{p,l}$		faktor otpora kod laminarnog strujanja za paralelni/šahovski smještaj cijevi
$\xi_{p,t}$	-	faktor otpora kod turbulentnog strujanja za paralelni/šahovski smještaj cijevi
$\dot{\eta}$	Ns/m ²	dinamička žilavost
ϑ	°C	temperatura
λ	W/mK	koeficijent toplinske vodljivosti
λ_{Cu}	W/mK	koeficijent toplinske vodljivosti bakra
ν	-	koeficijent zavarenog spoja
ρ	kg/m ³	gustoća
Φ	W	učin
ψ	-	poroznost snopa cijevi

Popis tehničke dokumentacije

Oznaka	Naziv	Mjerilo
DR-TĐ-001	Smještaj pregrada I. stupnja	1:20
DR-TĐ-002	Smještaj pregrada II. stupnja	1:20
DR-TĐ-003	Pregrada I. stupnja	1:5
DR-TĐ-004	Pregrada II. stupnja	1:10
DR-TĐ-005	Šahovski smještaj cijevi	1:1
DR-TĐ-006	Sušać zraka	1:20

Izjava

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći se dobivenom literaturom i znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Zahvala

Ovom prilikom želim se zahvaliti mentorima prof. dr. sc. Ivanki Boras i prof. dr. sc. Srećku Švaiću koji su prihvatili mentorstvo i predložili zanimljivu temu te mi ustupili potreban materijal i literaturu za izradu diplomskog rada. Posebno se zahvaljujem prof. dr. sc. Ivanki Boras na korisnim savjetima i pomoći, utrošenom vremenu i na velikom strpljenju i razumijevanju.

Zahvaljujem se svim kolegama s kojima sam surađivao tokom studija, a posebno se zahvaljujem kolegama Filipu Kosu i Jasminu Mekanoviću na nesebičnoj pomoći i lijepim studentskim uspomenama.

Želim se zahvaliti svojoj sestri Andreji koja mi je mnogo puta tokom studija bila velika moralna podrška te svojoj djevojci Ines na potpori tokom posljednjih dana studiranja i izrade diplomskog rada.

Posebna i najveća zahvala mojim roditeljima, Mariji i Andriji, kojima posvećujem ovaj diplomski rad. Hvala im što su mi omogućili bezbrižno školovanje i što su imali puno razumijevanja i strpljenja tokom cijelog obrazovanja.

Tomislav Đurak

1 UVOD

Izmjenjivači topline su toplinski aparati koji služe za izmjenu topline između dva ili više fluida, a čija je svrha hlađenje ili grijanje jednog od njih. Njihova primjena je izuzetno rasprostranjena. U kućanstvima izmjenjivače topline susrećemo u sustavima centralnog grijanja (kotlovi, radijatori, konvektori i sl.), sustavima hlađenja (isparivači, kondenzatori) i sustavima pripreme potrošne tople vode. Izmjenjivači topline veliku primjenu imaju i u industrijskim postrojenjima i u termoenergetskim postrojenjima. Razlikujemo tri vrste izmjene topline: provođenje, konvekcija i zračenje. U procesima se može odvijati jedna od navedenih vrsta izmjene topline ili međusobna kombinacija. Ako postoji kombinacija načina i vrsta izmjena topline, za proračun se uzima ona koja je najzastupljenija.

Izmjena topline putem provođenja se odvija na molekulskoj razini i do nje dolazi pri izravnom kontaktu dviju materija različitih temperatura, gdje energija prelazi s materije više temperature na materiju niže temperature. Srednja brzina gibanja molekula nekog tijela ovisi o temperaturi tijela, tj. ona raste povećanjem temperature odnosno pada smanjenjem temperature. Prilikom sudara molekula toplijeg tijela s molekulama hladnijeg, dolazi do predaje energije pri čemu se brže molekule usporavaju, a spore ubrzavaju, što dovodi do izjednačavanja temperature. Izmjena energije kod plinova se vrši difuzijom molekula, kod kapljevina i krutina elastičnim titrajima, a kod metala difuzijom slobodnih elektrona, te je stoga izmjena topline provođenjem ovisna o fizikalnim svojstvima tijela.

Konvekcija je način izmjene topline između fluida i krutog tijela koji se nalaze u direktnom kontaktu. Prilikom strujanja fluida dolazi do komešanja čestica (nesređenog gibanja) gdje čestice iz toplijih područja dopijevaju u hladna područja i obratno, te tako pridonose izmjeni topline. Povećanjem brzine gibanja povećava se i izmjena topline. Postoje dvije vrste konvekcije – slobodna (prirodna) i prisilna konvekcija. Kod slobodne konvekcije gibanje čestica je uzrokovano razlikama gustoća u različitim slojevima fluida. Čestice koje se nalaze uz toplu stijenku se zagrijevaju postaju lakše i izazivaju slobodno strujanje. Do gibanja čestica može doći zbog razlike tlakova koja je nametnuta nekim vanjskim uvjetima (npr. pumpama i ventilatorima) i u tom slučaju riječ je o prisilnom strujanju odnosno prisilnoj konvekciji. Postoje slučajevi u kojima se istovremeno javlja i slobodna i prisilna konvekcija, a koja od njih će biti utjecajnije na izmjenu topline ovisi o uvjetima u kojima se fluid nalazi. U slučaju da je temperaturna razlika između stijenke i fluida velika, utjecaj slobodne konvekcije će biti veći, dok će pri velikim brzinama strujanja utjecaj slobodne konvekcije biti zanemariv. Prilikom strujanja fluida, uz stijenku se stvara granični sloj čija debljina ovisi uglavnom o žilavosti i brzini strujanja fluida, te o formi stijenke. S obzirom na način strujanja fluida, razlikujemo laminarno i turbulentno strujanje.

Kod laminarnog strujanja čestice se gibaju u slojevima koji su paralelni sa stijenkom. Slojevi se međusobno ne miješaju tj. ne dolazi do međusobnog miješanja čestica iz različitih slojeva, te se izmjena topline pri laminarnom strujanju vrši provođenjem topline. Stoga izmjena topline kod laminarnog strujanja ovisi uglavnom o toplinskoj vodljivosti fluida. Povećanjem brzine strujanja dostiže se brzina, koja se naziva kritičnom brzinom strujanja, pri kojoj dolazi do naglog prijelaza iz laminarnog u turbulentno strujanje. Kritična brzina strujanja nije ista za sve fluide, ali osim vrste fluida na kritičnu brzinu utječe dimenzija kanala odnosno cijevi u kojoj fluid struji. Kod turbulentnog strujanja izmjena topline konvekcijom se odvija u laminarnom graničnom sloju, dok se u turbulentnom dijelu izmjena topline odvija putem intenzivnog miješanja uskomešanih čestica fluida. Kod svih do sada spomenutih vrsta izmjene topline pretpostavljeno je da ne dolazi do promjene agregatnog stanja fluida, međutim u industrijskim i termoenergetskim postrojenjima česta je pojava promjene agregatnog stanja fluida (isparavanje, kondenzacija, smrzavanje, taljenje, sublimacija). Kod procesa isparavanja i kondenzacije dolazi do direktnog prijelaza iz kapljevite u parnu fazu i obratno. Smrzavanje i taljenje vezano je uz prijelaz iz kapljevito u kruto stanje i obratno, dok je sublimacija prijelaz iz krutog u plinovito stanje. Odvođenjem topline pri konstantnom tlaku nekoj parnoj fazi, dolazi do smanjenja temperature pare sve do temperature zasićenja za taj tlak. Daljnjim odvođenjem topline počinju se pojavljivati prve kapljice odnosno započinje kondenzacija. U slučaju da stvoreni kondenzat u potpunosti oplahuje površinu stijenke u obliku neprekidnog sloja (filma), onda govorimo o filmskoj kondenzaciji. Ako se površina teško oplahuje i na njoj se stvaraju kapljice kondenzata koje brzo rastu i slijevaju se niz stijenu, tada govorimo o kapljičastoj kondenzaciji.

Prijenos topline pomoću elektromagnetskih zraka naziva se zračenje. Toplinsko zračenje se rasprostranjuje pravolinijski. Toplije tijelo zrači energiju, a dio te energije hladnije tijelo apsorbira i tako poveća svoju temperaturu. Ostatak dozračene energije hladnije tijelo ili propusti ili reflektirati. S obzirom da količina izmjenjene topline putem zračenja ovisi o temperaturi tijela, temperatura je mjerodavna veličina za proračun topline izmjenjene zračenjem. Za razliku od provođenja i konvekcije, izmjena topline zračenjem ne zahtijeva postojanje materije za prijenos topline, već se ono može izvoditi i u vakumu. [1]

2 TEORIJSKE OSNOVE I PRORAČUN TRANSPORTA TOPLINE U IZMJENJIVAČU

Kod proračuna izmjenjivača topline postoje tri mogućnosti:

a) Kontrola izvedenog izmjenjivača topline

Kod ovakvog slučaja proračuna zadatak je provjeriti da li već izvedeni izmjenjivač topline, poznate konstrukcije, zadovoljava nove pogonske uvjete. Zadatak se svodi na proračun koeficijenta prolaza topline i proračun potrebne izmjenjivačke površine koja mora biti jednaka ili manja od izvedene površine. Uz nepoznavanje veličina koje određuju bilancu topline izmjenjivača, ovakav se problem može riješiti samo iterativnim putem uz pomoć bezdimenzijskih značajka.

b) Proračun novog izmjenjivača topline

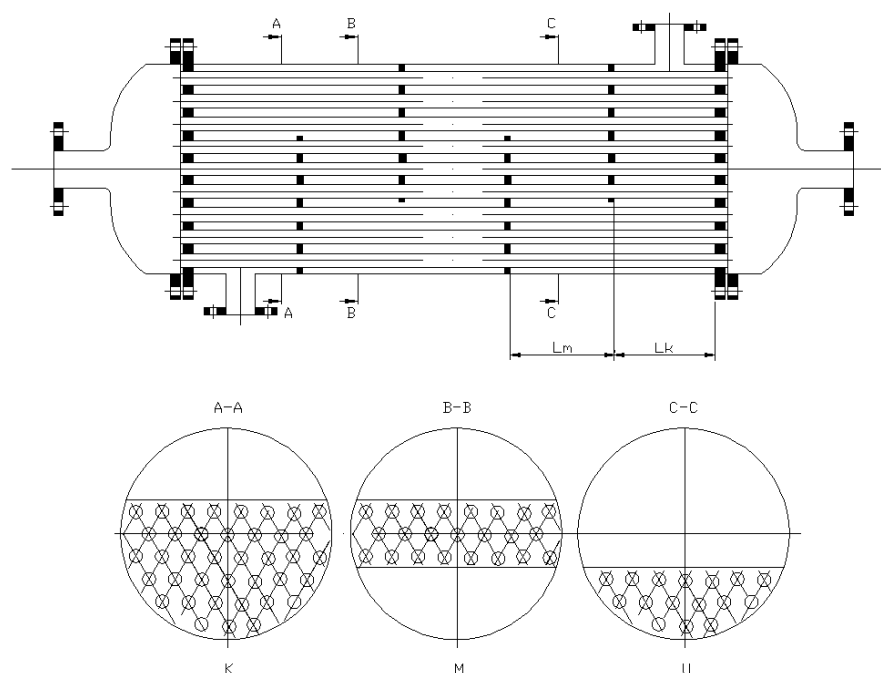
U odnosu na slučaj kontrole izvedenog izmjenjivača, pri proračunu novog izmjenjivača se iz zadanih uvjeta rada i uz pomoć pretpostavljenog koeficijenta prolaza topline izračuna potrebna površina aparata, a zatim se određuju same dimenzije izmjenjivača (promjer plašta, pregrade, broj cijevi u plaštu, broj prolaza i sl.). Na osnovu izabranih dimenzija potrebno je izračunati stvarni koeficijent prolaza topline i usporediti ga sa pretpostavljenim. Ako su stvarni i pretpostavljeni koeficijenti isti ili se malo razlikuju, proračun izmjenjivača se može smatrati ispravnim. Međutim, ako je razlika između stvarnog koeficijenta i pretpostavljenog velika, potrebno je ponoviti proračun sve dok se pretpostavljeni i stvarni koeficijent prolaza topline ne izjednače.

c) Optimiranje izmjenjivača topline

Prve dvije mogućnosti su pokazale kako se može proračunati da li izmjenjivač topline zadovoljava nove pogonske uvjete i kako je moguće odrediti dimenzije izmjenjivača na osnovi zadanih pogonskih uvjeta. Međutim, dimenzije i konstrukcijsko rješenje izmjenjivača topline moguće je dobiti na različite načine, a da svi udovoljavaju pogonskim uvjetima i zahtjevima. Optimiranje izmjenjivača topline podrazumijeva odabir jedne konstrukcijske i proračunske metode koja će u pogledu nekog određenog zahtijeva ili kriterija biti optimalna tj. najbolja. Mogućih kriterija pri optimiranju izmjenjivača je mnogo. Jedan od kriterija može biti sama veličina odnosno dimenzije izmjenjivača koje su određene prostorom u koji se smješta izmjenjivač. Cijena proizvodnje, odnosno optimalizacija ukupnih troškova proizvodnje je vrlo važan kriterij proizvođaču opreme. S druge strane, potrebno je obratiti pozornost na kriterije sa stajališta potrošača koji će biti vezani ne samo uz cijenu proizvodnje, nego i uz cijenu održavanja. [1]

2.1 Prijelaz topline u plaštu izmjenjivača

Da bi se povećala brzina strujanja radnog medija i poboljšao koeficijent prijelaza topline, u plašt aparata se postavljaju segmentne pregrade, čije postavljanje kao posljedicu ima naizmjenično poprečno i uzdužno strujanje medija. Na slici 1. prikazan je shematski prikaz jednog izmjenjivača sa segmentnim pregradama. Presjecima A-A, B-B i C-C prikazane su karakteristične zone strujanja.



Slika 1. Shematski prikaz izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama u plaštu aparata

Presjek A-A prikazuje ulaznu odnosno izlaznu zonu (tzv. krajnja zona) u kojoj preko cijevi radni medij poprečno nastrujava. Radni medij poprečno nastrujava preko cijevi i u međuzoni koja je prikazana presjekom B-B. Presjek C-C prikazuje uzdužno nastrujanu zonu u kojoj su cijevi, kako i samo ime zone kaže, uzdužno nastrujane. Za prijelaz topline u plaštu [1], s obzirom na volumen aparat koji zauzimaju, najveći utjecaj imaju međuzone i uzdužne zone. Najужи presjek strujanja u međuzoni izračunava se prema izrazu:

$$S_M = (2 * e_1 + \sum e) * L_M \quad (2.1.1)$$

gdje je: e_1 – razmak između plašta aparata i vanjskih cijevi [m]

e – razmak između pojedinih cijevi [m]

L_M – razmak između segmentnih pregrada [m]

Slobodni presjek strujanja u uzdužnoj zoni izračunava se prema izrazu:

$$S_U = \frac{D_u^2}{8} * \left(\frac{\gamma * \pi}{180} - \sin \gamma \right) - N_U * \frac{d_v^2 * \pi}{4} \quad (2.1.2)$$

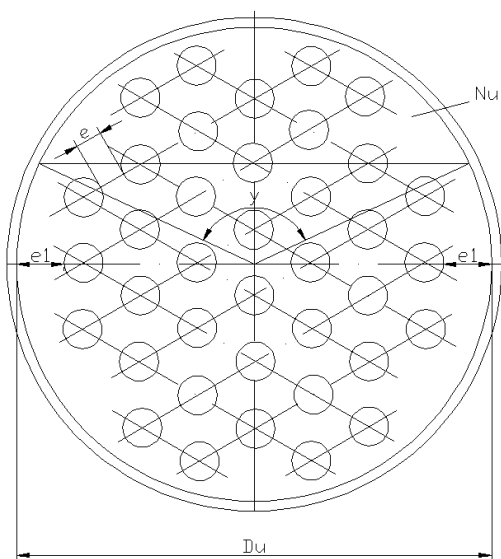
gdje je: D_U – unutarnji promjer plašta [m]
 γ – središnji kut segmentne pregrade [°]
 N_U – broj cijevi u uzdužnoj zoni
 d_v – vanjski promjer cijevi izmjenjivača [m]

Središnji kut segmentne pregrade:

$$\gamma = 2 * \cos^{-1} \left(1 - \frac{2H}{D_s} \right) \quad (2.1.3)$$

gdje je: H – visina odsječka segmentne pregrade [m]
 D_s – promjer segmentne pregrade [m]

Svi članovi, osim L_M , u dosad navedenim jednadžbama prikazani su na slici 2.



Slika 2. Definicija najužeg presjeka strujanja kod aparata s cijevima u plaštu

Za izračunavanje bezdimenzijskih veličina, prema Gnielinskom, potrebno je izračunati prestrujnu duljinu cijevi koja sa brzinom strujanja u slobodnoj simetrali definira izraz za Reynoldsov broj.

$$L = \frac{d_v * \pi}{2} \quad (2.1.4)$$

$$S_0 = D_u * L_M \quad (2.1.5)$$

$$w_0 = \frac{q_v}{S_0} \quad (2.1.6)$$

gdje je: q_v – volumni protok [m^3/s]
 L – prestrujna duljina cijevi [m]
 S_0 – slobodni presjek plašta [m^2]
 w_0 – brzina strujanja u slobodnom presjeku plašta [m/s]

Na temelju brzine strujanja medija i fizikalnih svojstava koja su određena temperaturom i tlakom (kod plinova), mogu se izračunati bezdimenzijski brojevi tj. bezdimenzijske značajke Re, Pr i Nu [2]. Reynoldsov broj Re prikazuje odnos inercijske sile koja pokušava ubrzati medij i sile trenja koja ga usporava, što znači da Reynoldsov broj označuje profil strujanja radnog medija. Prandtlov broj predstavlja odnos difuzije impulsa i toplinske difuzije, a definiraju ga samo fizikalna svojstva medija. Nusseltov broj Nu karakterizira proces konvektivne izmjene topline između radnog medija i krute stijene. On je obično nepoznat jer je izražen preko traženog koeficijenta prijelaza topline α . Jednadžbe kojima izračunavamo Nu najčešće ovise o Reynoldsovom i Prandtlovom broju, a sami oblik jednadžbe ovisi o tipu strujanja i o autoru jednadžbe. Prema Gnielinskom jednadžba za izračunavanje Nusseltovog broja kod plašta s pregradama vrijedi u području $10 < \text{Re} < 10^6$; $0,6 < \text{Pr} < 10^3$ i $f_A > 0,3$. U nastavku slijede jednadžbe po kojima su izračunate karakteristične bezdimenzijske značajke:

$$\text{Re} = \frac{w_0 * L * \rho}{\psi * \eta} \quad (2.1.7)$$

$$\text{Pr} = \frac{\eta * c_p}{\lambda} \quad (2.1.8)$$

$$\text{Nu} = f_A * \text{Nu}_{\text{SG}} \quad (2.1.9)$$

gdje je: ρ – gustoća radnog medija [kg/m^3]
 ψ – poroznost snopa cijevi prema (2.1.29)
 η – koeficijent dinamičke žilavosti [$\text{kg}/(\text{m} * \text{s})$]
 λ – koeficijent vodljivosti topline [$\text{W}/(\text{m} * \text{K})$]
 f_A – korekcijski faktor koji uzima u obzir odstupanje između ideal. i realnog aparata
 Nu_{SG} – Nusseltov broj za poprečno nastrujani snop glatkih cijevi

Korekcijski faktor f_A koji uzima u obzir odstupanja između idealnog i realnog aparata se izračunava prema jednadžbi:

$$f_A = f_S * f_B * f_L \quad (2.1.10)$$

- gdje je: f_S – korekcijski faktor koji uzima u obzir utjecaj uzdužnog strujanja
 f_B – korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed obilaznog strujanja
 f_L – korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed lekažnog strujanja

Korekcijski faktor uzdužnog strujanja f_S se izračunava pomoću omjera broja cijevi u uzdužnoj zoni N_U i ukupnog broja cijevi u plaštu N :

$$f_S = 1 - 2 * \frac{N_U}{N} + 0,654 * \left(\frac{N_U}{N}\right)^{0,32} \quad (2.1.11)$$

Korekcijski faktor uslijed obilaznog strujanja f_B jednak je 1 u slučaju da je $z_B = z_K$, inače se računa pomoću izraza:

$$f_B = \exp(-C_B * R_B * (1 - \sqrt[3]{Z_B/Z_K})) \quad (2.1.12)$$

$$R_B = \frac{S_B}{S_M} \quad (2.1.13)$$

$$S_B = (D_U - D_C - e) * L_K, \text{ za } e < D_U * D_C \quad (2.1.14)$$

$$S_B = 0, \text{ za } e > D_U * D_C \quad (2.1.15)$$

- gdje je: C_B – konstanta, za $Re < 100$ $C_B = 1,5$; za $Re > 100$ $C_B = 1,35$
 Z_B – broj brtvenih traka
 Z_K – broj poprečno nastrujanih redova cijevi u krajnjoj zoni
 R_B – omjer slobodnog presjeka za obilazno strujanje i najužeg presjeka strujanja
 S_B – slobodni presjek za obilazno strujanje [m^2]
 D_C – promjer kruga koji tangira cijevi najudaljenije od centra [m]

Korekcijski faktor za lekažno strujanje f_L računa se pomoću izraza:

$$f_L = 0,4 * R_C + (1 - 0,4 * R_C) * \exp(-1,5 * R_L) \quad (2.1.16)$$

$$R_C = \frac{S_{LC}}{S_L} \quad (2.1.17)$$

$$S_{LC} = (N - N_U) * \frac{(d_B^2 - d_v^2) * \pi}{4} \quad (2.1.18)$$

$$S_L = S_{LC} + S_{LPS} \quad (2.1.19)$$

$$S_{LPS} = \frac{(D_U^2 - D_S^2) * \pi}{4} * \frac{360 - \gamma}{360} \quad (2.1.20)$$

$$R_L = \frac{S_L}{S_M} \quad (2.1.21)$$

gdje je: R_C – omjer prstenastog presjeka i ukupnog presjeka lekažnog strujanja
 S_{LC} – prstenasti presjek za lekažno strujanje između cijevi i otvora [m²]
 S_L – ukupni presjek za lekažno strujanje [m²]
 S_{LPS} – presjek za lekažno strujanje između plašta aparata i pregrade [m²]
 R_L – omjer ukupnog presjeka za lekažno strujanje i najužeg presjeka strujanja

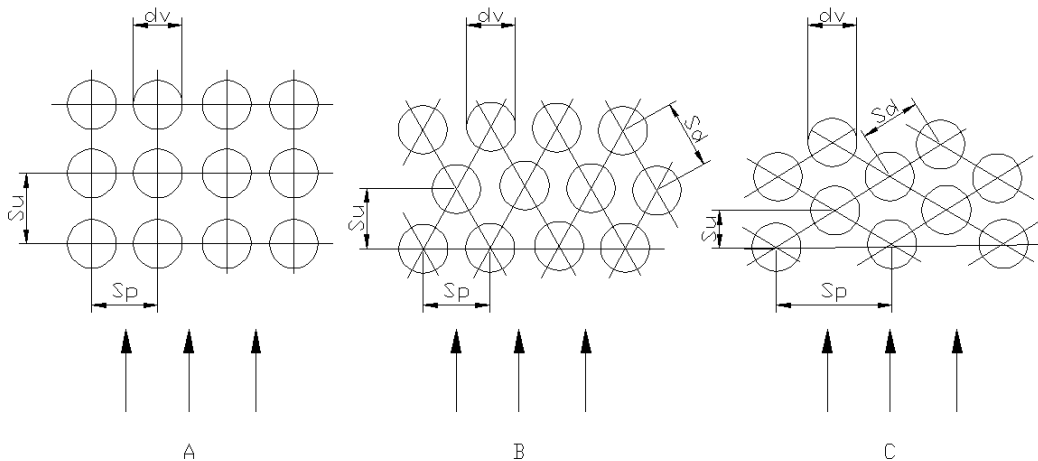
Za proračun Nusseltovog broja kod poprečno nastrujanih glatkih cijevi Nu_{SG} , Gnielinski preporuča izraze:

$$Nu_{SG} = f_s * Nu_c, \text{ za } z_p > 10 \quad (2.1.22)$$

$$Nu_{SG} = \frac{1 + (z_p - 1)}{z_p}, \text{ za } z_p < 10 \quad (2.1.23)$$

gdje je: f_s – korekcijski faktor položaja cijevi unutar snopa
 Nu_c – Nusseltov broj za poprečno nastrujanu glatku cijev
 z_p – broj redova poprečno nastrujanih cijevi

Na slici 3. su prikazane tri različite izvedbe snopa cijevi u plaštu.



Slika 3. Izvedbe poprečno nastrujanih snopova cijevi;
A – paralelan smještaj cijevi, B i C – šahovski smještaj cijevi

Izvedba A ima paralelan smještaj cijevi, dok su kod izvedbe B i C cijevi smještene naizmjenično, a takav način smještaja cijevi se naziva šahovskim smještajem cijevi. U izvedbi B najuži presjek nalazi se poprečno na smjer strujanja, dok se u C izvedbi najuži presjek nalazi u smjeru

dijagonale. Na slici su označeni razmaci (koraci) između cijevi sa „s“, gdje se indeksi „p“, „u“ i „d“ odnose na poprečni, uzdužni i dijagonalni korak te je pomoću njih moguće odrediti normirane korake cijevi.

$$t_p = \frac{s_p}{d_v} \quad (2.1.24)$$

$$t_u = \frac{s_u}{d_v} \quad (2.1.25)$$

$$t_d = \frac{s_d}{d_v} \quad (2.1.26)$$

gdje je: t_p – normirani poprečni korak cijevi
 t_u – normirani uzdužni korak cijevi
 t_d – normirani dijagonalni korak cijevi

Poznavajući normirane korake cijevi, korekcijski faktor koji uzima u obzir smještaj cijevi unutar snopa možemo izračunati pomoću izraza:

$$f_s = 1 + \frac{2}{3 \cdot t_u}, \text{ za šahovski smještaj} \quad (2.1.27)$$

$$f_s = 1 + \frac{0,7}{\psi^{1,5}} * \frac{t_p/t_u - 0,3}{(t_u/t_p + 0,7)^2}, \text{ za paralelni smještaj cijevi} \quad (2.1.28)$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot t_p}, \text{ za } t_u > 1 \quad (2.1.29)$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot t_p \cdot t_u}, \text{ za } t_u < 1 \quad (2.1.30)$$

gdje je: ψ – poroznost snopa cijevi

Za izračunavanje Nusseltovog broja kod poprečno nastrojanih glatkih cijevi Nu_c u području $1 < Re < 10^7$ i $0,6 < Pr < 10^3$ Gnielinski preporučuje izraze:

$$Nu_c = [0,3 + (Nu_l^2 + Nu_t^2)^{0,5}] * f_Q \quad (2.1.31)$$

$$Nu_l = 0,664 * Re^{0,5} * Pr^{1/3} \quad (2.1.32)$$

$$Nu_t = \frac{0,037 * Re^{0,8} * Pr}{1 + \frac{2,443}{Re^{0,1}} * (Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.1.33)$$

gdje je: Nu_l – Nusseltov broj pri laminarnom strujanju
 Nu_t – Nusseltov broj pri turbulentnom strujanju
 f_Q – faktor koji uzima u obzir smjer izmjene topline, približno je jednak 1

S obzirom da je Nusseltov broj definiran kao:

$$Nu = \frac{\alpha * L}{\lambda} \quad (2.1.34)$$

laganom transformacijom dolazimo do izraza pomoću kojeg izračunavamo koeficijent prijelaza topline α :

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda}{L} \quad (2.1.35)$$

Bitno je naglasiti da postoji više načina i metoda izračunavanja prijelaza topline u plaštu s pregradama. Međusobna usporedba koeficijenata prijelaza topline računatih po različitim metodama i izrazima pokazuje da odstupanja mogu varirati i do +/- 50%. S takvim velikim rasponom odstupanja očito je da nijedan postupak i model ne može točno opisati izmjenu topline u takvom plaštu. Najbolji podaci dobili bi se mjerenjem pogonskih parametara, međutim, pri izradi projekta ispitivanja nisu moguća, stoga se preporuča proračunavanje koeficijenta prijelaza na više metoda i usporedba dobivenih rezultata.

2.2 Prijelaz topline u cijevima izmjenjivača

Prijelaz topline u kanalima kružnog presjeka [1] odnosno cijevima može se odvijati pri tri različita stanja strujanja: laminarno strujanje, turbulentno strujanje i prijelazno strujanje. Laminarno strujanje se javlja kod cijevi malih promjera u kojima se nalazi vrlo žilavi (viskozni) radni medij niske brzine strujanja. Kod ovakvog oblika strujanja pojedini slojevi medija se kreću usporedno s osi strujanja i ne dolazi do poprečnog miješanja slojeva. Povećanjem brzine strujanja dostiže se turbulentno strujanje. Pri turbulentnom strujanju se pored glavne struje u smjeru osi strujanja pojavljuju i poprečne komponente koje uzrokuju intenzivnije miješanje. Prijelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje se događa pri određenoj kritičnoj vrijednosti Reynoldsovog broja, a koja se postiže pri kritičnoj brzini. Eksperimenti raznih autora doveli su do zaključka da pri $Re < 2320$ strujanje pokazuje svojstva laminarnog, a pri $Re > 2330$ pokazuje svojstva turbulentnog strujanja.

Za laminarno područje gdje je $Re < 2320$ Nusseltov broj se računa prema izrazu:

$$Nu = 0,667 * Re^{0,5} * Pr^{0,33} \quad (2.2.1)$$

Za turbulentna područja gdje je $2320 < Re < 10^4$, prema Hausenu, Nusseltov broj se izračunava pomoću izraza:

$$Nu = 0,0235 * (Re^{0,8} - 230) * (1,8 * Pr^{0,3} - 0,8) * f_G * f_Q \quad (2.2.2)$$

$$f_G = 1 + \left(\frac{d_u}{L}\right)^{2/3} \quad (2.2.3)$$

gdje je: f_G – geometrijski faktor

d_u – unutarnji promjer cijevi [m]

L – duljina izmjenjivača [m]

Prema Mihejevu, za turbulentna područja gdje je $Re > 10^4$, Nusseltov broj se može izračunati izrazom:

$$Nu = 0,021 * Re^{0,8} * Pr^{0,43} \quad (2.2.4)$$

Koeficijent prijelaza topline u cijevima se dobije pomoću izraza:

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda}{d_u} \quad (2.2.5)$$

3 TEORIJSKE OSNOVE I PRORAČUNA PADA TLAKU KOD IZMJENJIVAČA S PREGRADAMA U PLAŠTU

3.1 Pad tlaka u plaštu izmjenjivača

Ukupni pad tlaka u plaštu izmjenjivača s pregradama Δp [1] se sastoji od pada tlaka u priključku (ulaznom i izlaznom) Δp_{pr} , pada tlaka u krajnjoj zoni Δp_{kr} , pada tlaka u međuzoni Δp_m i pada tlaka u uzdužnoj zoni Δp_u , kako je prikazano na slici 1.

$$\Delta p = \Delta p_{pr} + \Delta p_{kr} + \Delta p_m + \Delta p_u \quad (3.1.1)$$

Pad tlaka u priključku aparata računa se prema izrazu:

$$\Delta p_{pr} = \xi_{pr} * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} \quad (3.1.2)$$

gdje je: ξ_{pr} – faktor otpora priključka aparata

w_{pr} – brzina medija u priključku aparata [m/s]

Pad tlaka u krajnjoj zoni računa se pomoću izraza:

$$\Delta p_k = 2 * \Delta p_{1,k} \quad (3.1.3)$$

$$\Delta p_{1,k} = f_B * \Delta p_{i,k} \quad (3.1.4)$$

$$\Delta p_{i,k} = \xi_{i,k} * z_k * \frac{\rho * w_k^2}{2} \quad (3.1.5)$$

gdje je: $\Delta p_{1,k}$ – pad tlaka u jednoj od krajnjih zona [N/m²]

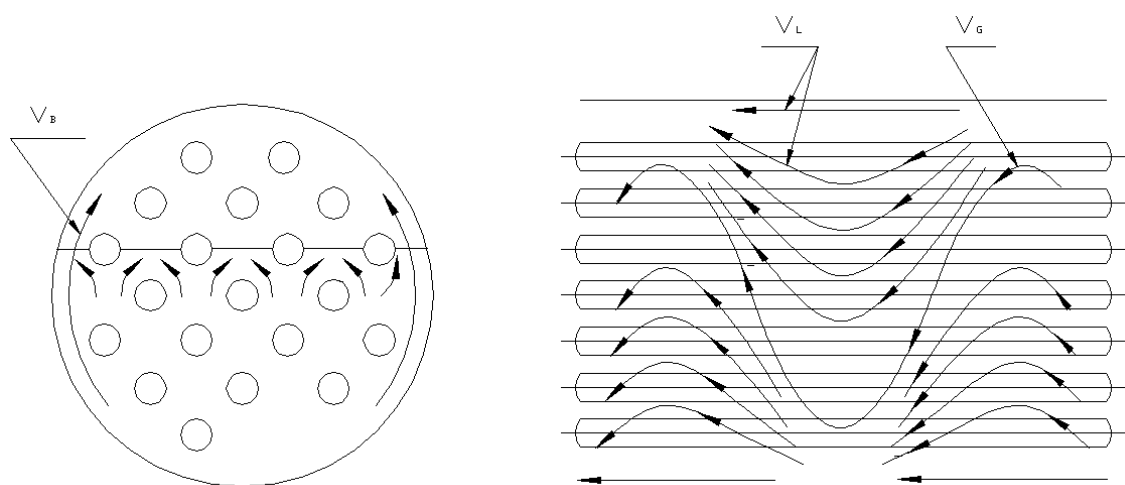
$\Delta p_{i,k}$ – pad tlaka u jednoj od krajnjih zona idealnog aparata [N/m²]

f_B – korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed obilaznog strujanja prema (2.1.12); $C_B=3,7$

$\xi_{i,k}$ – faktor otpora idealnog aparata u krajnjoj zoni

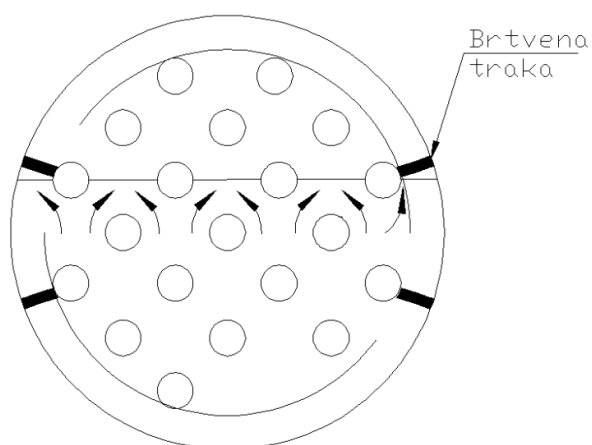
z_k – broj poprečno nastrujanih redova u krajnjoj zoni

Idealnim aparatom smatra se onaj aparat kod kojeg ne dolazi do obilaznog i lekažnog strujanja. Na slici 4. je prikazano strujanje medija u plaštu aparata sa segmentnim pregradama, gdje je glavna struja označena s V_G . Strujanje koje se javlja između vanjskih redova cijevi i plašta aparata naziva se obilazno strujanje V_B . Dio glavne struje prolazi kroz prstenasti presjek između otvora u pregradama i cijevi, odnosno između plašta i pregrada i naziva se lekažno strujanje V_L .



Slika 4. Shematski prikaz strujanja u plaštu aparata s pregradama

Kako bi se smanjilo obilazno strujanje u plaštu aparata mogu se postaviti brtvene trake, čiji je shematski prikaz na slici 5.



Slika 5. Shematski prikaz brtvenih traka

Koeficijent otpora idealnog aparata $\xi_{i,k}$ izračunava se pomoću izraza:

a) za paralelni smještaj cijevi u plaštu $\xi_{i,k} = \xi_p$

$$\xi_p = \xi_{p,l} + \xi_{p,t} * \left[1 - \exp \left(-\frac{1000 + Re}{2000} \right) \right] \quad (3.1.6)$$

$$\xi_{p,l} = \frac{F_{p,l}}{Re} \quad (3.1.7)$$

$$F_{p,l} = \frac{280 * (\sqrt{t_u} - 0,6)^2 + 210}{\left[\frac{4 * t_p * t_u}{\pi} - 1 \right] * t^{1,6}} \quad (3.1.8)$$

$$\xi_{p,t} = \frac{F_{p,t}}{Re^{0,1} * (t_u/t_p)} \quad (3.1.9)$$

$$F_{p,t} = \left[0,22 + 1,2 * \frac{(1 - 0,94/t_u)^{0,6}}{(t_p - 85)^{1,3}} \right] * 10^{0,47 * (t_p/t_u - 1,5)} + 0,03 * (t_p - 1) * (t_u - 1) \quad (3.1.10)$$

$$t = t_p, \text{ za izvedbe A i B prema slici 3.} \quad (3.1.11)$$

$$t = t_d, \text{ za izvedbu C prema slici 3.} \quad (3.1.12)$$

Navedeni izrazi vrijede za:

$$Re < 10^3: t_p * t_u = 1,25 * 1,25 \text{ do } 2 * 2$$

$$10^3 < Re < 3 * 10^5: 1,25 \leq t_p \leq 3,0 \text{ i } 1,20 \leq t_u \leq 3,0$$

gdje je: ξ_p – ukupni faktor otpora kod poprečno nastrojanog snopa cijevi za paralelni smještaj cijevi

$\xi_{p,l}$ – faktor otpora kod laminarnog strujanja za paralelni smještaj cijevi

$F_{p,l}$ – pomoćni faktor kod laminarnog strujanja

$\xi_{p,t}$ – faktor otpora kod turbulentnog strujanja za paralelni smještaj cijevi

$F_{p,t}$ – pomoćni faktor kod turbulentnog strujanja

b) za šahovski smještaj cijevi $\xi_{i,k} = \xi_s$

$$\xi_s = \xi_{s,l} + \xi_{s,t} * \left[1 - \exp \left(-\frac{200 + Re}{1000} \right) \right] \quad (3.1.13)$$

$$\xi_{s,l} = \xi_{p,l} \quad (3.1.14)$$

$$\xi_{s,t} = \frac{F_{s,t}}{Re^{0,25}} \quad (3.1.15)$$

$$F_{s,t} = 2,5 + \frac{1,2}{(t_p - 0,85)^{1,06}} + 0,4 * [(t_u/t_p) - 1]^3 - 0,01 * [(t_p/t_u) - 1]^3 \quad (3.1.16)$$

Navedeni izrazi vrijede za:

$$Re < 10^3: t_p * t_u = 1,25 * 1,0825 \text{ do } 1,768 * 0,883$$

$$10^3 < Re < 3 * 10^5: 1,25 \leq t_p \leq 3,0; 0,60 \leq t_u \leq 3,0 \text{ i } 1,25 \leq t_u$$

gdje je: ξ_p – ukupni faktor otpora kod poprečno nastrojanog snopa cijevi za šahovski smještaj cijevi

$\xi_{p,l}$ – faktor otpora kod laminarnog strujanja za šahovski smještaj cijevi

$F_{p,l}$ – pomoćni faktor kod laminarnog strujanja

$\xi_{p,t}$ – faktor otpora kod turbulentnog strujanja za šahovski smještaj cijevi

$F_{p,t}$ – pomoćni faktor kod turbulentnog strujanja

Pad tlaka u međuzoni izračunava se pomoću izraza:

$$\Delta p_m = (z_s - 1) * f_L * f_B * \Delta p_{i,m} \quad (3.1.17)$$

$$f_L = \exp \left[-1,33 * (1 + R_P) * R_L^{(0,65 - 0,15 * R_P)} \right] \quad (3.1.18)$$

$$R_P = \frac{S_{LPS}}{S_L} \quad (3.1.19)$$

$$\Delta p_{i,m} = \xi_{i,m} * z_p * \frac{\rho * w_m^2}{2} \quad (3.1.20)$$

gdje je: Δp_m – pad tlaka u međuzoni [N/m²]

f_L – korekcijski faktor za lekažno strujanje

$\Delta p_{i,m}$ – pad tlaka u međuzoni idealnog aparata [N/m²]

z_s – broj segmentnih pregrada

R_P – omjer ukupnog presjeka za lekažno strujanje i presjeka za lekažno strujanje između plašta aparata i pregrade

S_{LPS} – presjek za lekažno strujanje između plašta aparata i pregrade prema (2.1.20)

S_L – ukupni presjek za lekažno strujanje prema (2.1.19)

$\xi_{i,m}$ – faktor otpora idealnog aparata u međuzoni (prema 3.1.6 ili 3.1.13)

z_p – broj poprečno nastrojanih redova

Pad tlaka u uzdužnoj zoni izračunava se pomoću izraza:

$$\Delta p_u = z_s * F * f_L * \sqrt{\Delta p_l^2 + \Delta p_t^2} \quad (3.1.21)$$

$$\Delta p_l = \left(\frac{56 * z_u}{Re_1} + \frac{52 * L_M}{d_h * Re_2} + 2 \right) * \frac{\rho * w^2}{2} \quad (3.1.22)$$

$$\Delta p_t = (0,6 * z_u + 2) * \frac{\rho * w^2}{2} \quad (3.1.23)$$

$$Re_1 = \frac{w * \rho * e}{\eta} \quad (3.1.24)$$

$$Re_2 = \frac{w * \rho * d_h}{\eta} \quad (3.1.25)$$

$$d_h = \frac{4 * S_u}{Nu * d_v * \pi + \frac{D_u * \pi * \gamma}{360} + D_u * \sin \frac{\gamma}{2}} \quad (3.1.26)$$

$$z_u = 0,8 * \frac{H}{S_u} \quad (3.1.27)$$

gdje je: Δp_u – pad tlaka u uzdužnoj zoni [N/m²]

z_u – broj poprečno nastrojanih redova

d_h – hidraulički promjer segmentnog odsječka [m]

F – korekcijski faktor, približno jednak 1

Kao i kod proračuna topline i kod proračuna pada tlaka postoji više načina i više autora (Donohoue, Gaddis, Slipčević i dr.) koji predstavljaju različite načine proračuna. Navedeni postupak je proračun pada tlaka prema Gaddisu. Takvi različiti načini proračuna mogu i kod pada tlaka dovesti do odstupanja u rezultatima +/- 50%.

3.2 Pad tlaka u cijevnom snopu

Pad tlaka u cijevima izmjenjivača Δp_{cs} [1] se sastoji od pada tlaka u priključku (ulaznom i izlaznom) Δp_p , pada tlaka na ulazu i izlazu u cijevni snop Δp_{ui} i pada tlaka u cijevima Δp_c .

$$\Delta p_{cs} = \Delta p_p + \Delta p_{ui} + \Delta p_c \quad (3.2.1)$$

Pad tlaka u priključcima i na ulazu/izlazu u snop se računaju pomoću općenite jednadžbe za izračunavanje tlaka:

$$\Delta p = \xi * \frac{\rho * w^2}{2} \quad (3.2.2)$$

gdje je: ξ – faktor trenja

Pad tlaka u cijevima se izračunava pomoću izraza:

$$\Delta p_c = \xi * \frac{L}{d_u} * \frac{\rho * w^2}{2} \quad (3.2.3)$$

$$\varepsilon = \frac{k}{d_u} \quad (3.2.4)$$

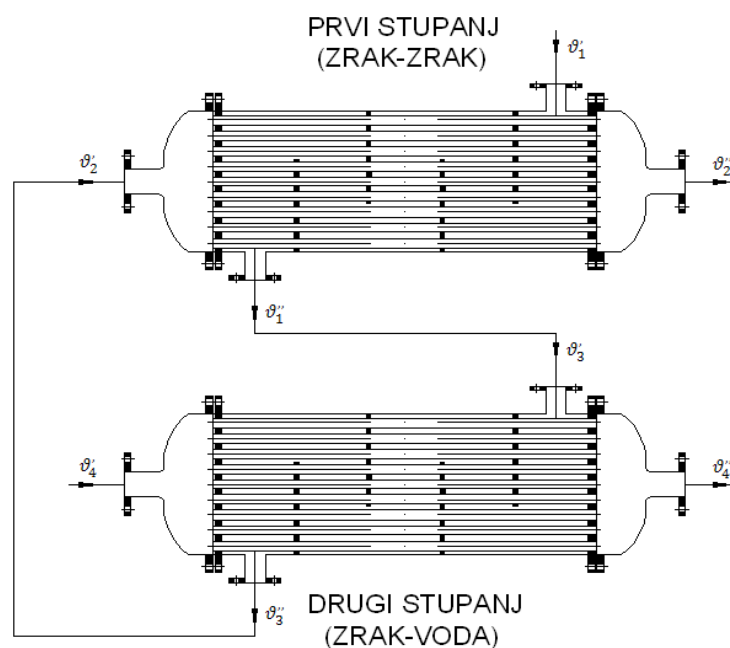
$$\xi = f(Re, \varepsilon) \quad (3.2.5)$$

gdje je: k – hrapavosti cijevi [mm]

ξ – faktor trenja očitani iz Moodyevog dijagrama kao funkcija Re i ε

4 TEHNIČKI OPIS PROCESA HLAĐENJA

Zadani sušač zraka je dvostupanjski aparat koji se sastoji od dva izmjenjivača s cijevnim snopom u plaštu (eng. „shell and tube“). Vrući zrak temperature ϑ_1' ulazi u plašt aparata prvog stupnja (izmjenjivač zrak-zrak), struji preko cijevnog snopa i hladi se na izlaznu temperaturu ϑ_1'' , koja je ujedno i ulazna temperatura ϑ_3' u plašt drugog stupnja (izmjenjivač zrak-voda). Zrak u plaštu izmjenjivača drugog stupnja se hladi, pomoću vode ulazne temperature ϑ_4' , na temperaturu ϑ_3'' pri čemu se iz zraka izlučuje vlaga. Ohlađeni i odvlaženi zrak prelazi u cijevi prvog stupnja (ulazna temperatura zraka u cijevima prvog stupnja ϑ_2' jednaka je izlaznoj temperaturi zraka iz plašta drugog stupnja ϑ_3''), gdje se grije toplineom koju mu predaje zrak u plaštu ulazne temperature ϑ_1' .



Slika 6. Shematski prikaz procesa

- gdje je: ϑ_1' - ulazna temperatura zraka u plašt izmjenjivača prvog stupnja
 ϑ_1'' - izlazna temperatura zraka iz plašta izmjenjivača prvog stupnja
 ϑ_2' - ulazna temperatura zraka u cijevi izmjenjivača prvog stupnja
 ϑ_2'' - izlazna temperatura zraka iz cijevi izmjenjivača prvog stupnja
 ϑ_3' - ulazna temperatura zraka u plašt izmjenjivača drugog stupnja
 ϑ_3'' - izlazna temperatura zraka iz plašta izmjenjivača drugog stupnja
 ϑ_4' - ulazna temperatura vode u cijevi izmjenjivača drugog stupnja
 ϑ_4'' - izlazna temperatura vode iz cijevi izmjenjivača drugog stupnja

5 PRORAČUN UČINA ZA OBA IZMJENJIVAČA

Za zadane ulazne parametre radnih medija, konstrukcijske parametre i dimenzije izmjenjivača u radu, potrebno je odrediti učin, odnosno izlazne temperature medija. S obzirom na ograničen broj ulaznih parametara do rješenja se došlo iterativnim putem. Aparat se sastoji od dva izmjenjivača (tip izmjenjivača - snopom cijevi u plaštu). Postupak izvođenja proračuna vezan je uz prijelaz topline u plaštu i u cijevima izmjenjivača. Na temelju ulaznih parametara radnih medija dobiveni su koeficijenti prijelaza topline u plaštu i cijevima izmjenjivača, te koeficijent prolaza topline pomoću kojeg je određen učin izmjenjivača.

Prema navedenim jednadžbama u poglavlju 2 proveden je proračun učina izmjenjivača prvog stupnja (zrak-zrak) i drugog stupnja (voda-zrak).

5.1 Prvi stupanj (zrak-zrak)

Za prvi stupanj aparata zadani su ulazni parametri i geometrijske veličine:

$q_{vn}=33000 \text{ m}_n^3/\text{h}$	– protočna količina zraka
$p=5 \text{ bar}$	– proračunski tlak
$\theta_1=104^\circ\text{C}$	– radna temperatura
$x_1=27 \text{ g/kg}$	– vlažnost zraka na ulazu u aparat
$n=401$	– broj cijevi u izmjenjivaču
$d_v=0,022 \text{ m}$	– vanjski promjer cijevi
$d_u=0,020 \text{ m}$	– unutarnji promjer cijevi
$\lambda_{Cu}=372 \text{ W/mK}$	– koeficijent toplinske vodljivosti bakra
$D_u=0,7 \text{ m}$	– unutarnji promjer plašta
$D_s=0,698 \text{ m}$	– promjer pregrade
$L_f=2,4 \text{ m}$	– duljina izmjenjivača
$L_M=0,706 \text{ m}$	– razmak između pregrada
$e=0,01 \text{ m}$	– razmak između cijevi
$e_1=0,0505 \text{ m}$	– razmak između plašta aparata i vanjskih cijevi
$N_u=83$	– broj cijevi u uzdužnoj zoni
$H=0,238 \text{ m}$	– visina odsječka segmentne pregrade

5.1.1 Proračun prijelaza topline u plaštu izmjenjivača I. stupnja:

Napomena: proračun se izvodi za pretpostavljenu srednju temperaturu zraka $\vartheta_{1sred} = \vartheta_1'$

$M_u = 28,96 \text{ kg/kmol}$ – molarna masa uzduha

protočna masa zraka:

$$q_{mu} = \frac{q_{vn}}{22,41} * M_u = \frac{33000}{22,41} * 28,96 = 42645,33 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \left(11,85 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \quad (5.1.1)$$

protočna masa kroz jednu cijev:

$$q_{mc} = \frac{q_{mu}}{n} = \frac{42645,33}{401 * 3600} = 0,0295 \text{ kg/s} \quad (5.1.2)$$

prema (2.1.5):

$$S_0 = D_u * L_M = 0,7 * 0,706 = 0,49 \text{ m}^2 \quad (5.1.3)$$

prema (2.1.4)

$$L = \frac{d_v * \pi}{2} = \frac{0,022 * \pi}{2} = 0,0345 \text{ m} \quad (5.1.4)$$

Svojstva zraka za srednju temperaturu [3]:

$\rho_{5bar} = 4,678 \text{ kg/m}^3$ – gustoća zraka za srednju temp. pri tlaku od 5 bar

$\eta = 24,12 * 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ – dinamička žilavost zraka za srednju temperaturu

$\lambda = 0,0322 \text{ W/mK}$ – koeficijent toplinske vodljivosti zraka za srednju temperaturu

$c_p = 1021,34 \text{ J/kgK}$ – specifični toplinski kapacitet zraka za srednju temperaturu

protočni volumen u plaštu:

$$q_v = \frac{q_{mu}}{\rho_{4,2bar}} = \frac{42645,33}{4,678 * 3600} = 2,53 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.1.5)$$

prema (2.1.6):

$$w_0 = \frac{q_v}{S_0} = \frac{2,53}{0,49} = 5,13 \text{ m/s} \quad (5.1.6)$$

prema (2.1.25):

$$t_u = \frac{s_u}{d_v} = \frac{0,02771}{0,022} = 1,26 \quad (5.1.7)$$

prema (2.1.24):

$$t_p = \frac{s_p}{d_v} = \frac{0,032}{0,022} = 1,46 \quad (5.1.8)$$

prema (2.1.29):

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 * t_p} = 1 - \frac{\pi}{4 * 1,46} = 0,46 \quad (5.1.9)$$

prema (2.1.7):

$$Re = \frac{w_o * L * \rho}{\psi * \eta} = \frac{5,13 * 0,03454 * 4,678}{0,4623 * 24,11 * 10^{-6}} = 74284 \quad (5.1.10)$$

prema (2.1.8):

$$Pr = \frac{\eta * c_p}{\lambda} = \frac{24,11 * 10^{-6} * 1021,36}{0,03221} = 0,765 \quad (5.1.11)$$

prema (2.1.11):

$$\begin{aligned} f_s &= 1 - 2 * \frac{N_U}{N} + 0,654 * \left(\frac{N_U}{N}\right)^{0,32} \\ &= 1 - 2 * \frac{83}{401} + 0,654 * \left(\frac{83}{401}\right)^{0,32} = 0,98 \end{aligned} \quad (5.1.12)$$

prema (2.1.14):

$$\begin{aligned} S_B &= (D_U - D_C - e) * L_K = (0,7 - 0,672 - 0,01) * 0,847 \\ &= 0,0152 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5.1.13)$$

prema (2.1.1):

$$\begin{aligned} S_M &= (2 * e_1 + \Sigma e) * L_M = (2 * 0,0505 + 18 * 0,01) * 0,706 \\ &= 0,1765 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5.1.14)$$

prema (2.1.13):

$$R_B = \frac{S_B}{S_M} = \frac{0,0152}{0,1765} = 0,0864 \quad (5.1.15)$$

prema (2.1.12):

$$\begin{aligned} f_B &= \exp\left(-C_B * R_B * \left(1 - \sqrt[3]{Z_B/Z_K}\right)\right) \\ &= \exp\left(-1,35 * 0,0864 * \left(1 - \sqrt[3]{0}\right)\right) = 0,8899 \end{aligned} \quad (5.1.16)$$

prema (2.1.18):

$$\begin{aligned} S_{LC} &= (N - N_U) * \frac{(d_B^2 - d_V^2) * \pi}{4} \\ &= (401 - 81) * \frac{(0,023^2 - 0,022^2) * \pi}{4} \\ &= 0,0113 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5.1.17)$$

prema (2.1.20):

$$\begin{aligned} S_{LPS} &= \frac{(D_U^2 - D_S^2) * \pi}{4} * \frac{360 - \gamma}{360} \\ &= \frac{(0,7^2 - 0,698^2) * \pi}{4} * \frac{360 - 143,39}{360} \\ &= 0,0013 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5.1.18)$$

prema (2.1.19):

$$S_L = S_{LC} + S_{LPS} = 0,0113 + 0,0013 = 0,0126 \text{ m}^2 \quad (5.1.19)$$

prema (2.1.17):

$$R_C = \frac{S_{LC}}{S_L} = \frac{0,0113}{0,0126} = 0,895 \quad (5.1.20)$$

prema (2.1.21):

$$R_L = \frac{S_L}{S_M} = \frac{0,0126}{0,1765} = 0,0715 \quad (5.1.21)$$

prema (2.1.16):

$$\begin{aligned} f_L &= 0,4 * R_C + (1 - 0,4 * R_C) * \exp(-1,5 * R_L) \\ &= 0,4 * 0,895 + (1 - 0,4 * 0,895) \\ &\quad * \exp(-1,5 * 0,0715) = 0,94 \end{aligned} \quad (5.1.22)$$

prema (2.1.27):

$$f_s = 1 + \frac{2}{3 * t_u} = 1 + \frac{2}{3 * 1,26} = 1,53 \quad (5.1.23)$$

prema (2.1.32):

$$\begin{aligned} Nu_l &= 0,664 * Re^{0,5} * Pr^{1/3} = 0,664 * 74284^{0,5} * 0,765^{1/3} \\ &= 165,49 \end{aligned} \quad (5.1.24)$$

prema (2.1.33):

$$\begin{aligned} Nu_t &= \frac{0,037 * Re^{0,8} * Pr}{1 + \frac{2,443}{Re^{0,1}} * (Pr^{2/3} - 1)} = \frac{0,037 * 74284^{0,8} * 0,765}{1 + \frac{2,443}{74284^{0,1}} * (0,765^{2/3} - 1)} \\ &= 256,47 \end{aligned} \quad (5.1.25)$$

prema (2.1.31):

$$\begin{aligned} Nu_c &= [0,3 + (Nu_l^2 + Nu_t^2)^{0,5}] * f_Q \\ &= [0,3 + (165,49^2 + 256,47^2)^{0,5}] * 1 = 305,53 \end{aligned} \quad (5.1.26)$$

prema (2.1.22):

$$Nu_{SG} = f_s * Nu_c = 1,53 * 305,53 = 467,18 \quad (5.1.27)$$

prema (2.1.10):

$$f_A = f_s * f_B * f_L = 0,98 * 0,8899 * 0,94 = 0,82 \quad (5.1.28)$$

prema (2.1.9):

$$Nu = f_A * Nu_{SG} = 0,82 * 467,18 = 383,94 \quad (5.1.29)$$

prema (2.1.35):

$$\alpha_v = \frac{Nu * \lambda}{L} = \frac{383,94 * 0,0322}{0,03435} = 358,06 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (5.1.30)$$

5.1.2 Proračun prijelaza topline u cijevima izmjenjivača I. stupnja:

Napomena: proračun se izvodi za pretpostavljenu srednju temp. zraka $\vartheta_{2sred} = \vartheta'_2 = 35^\circ\text{C}$

Svojstva zraka za srednju temperaturu [3]:

$\rho_{5bar}=5,702 \text{ kg/m}^3$ – gustoća zraka za srednju temperaturu pri 5 bar

$\eta=21,33 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ – dinamička žilavost za srednju temperaturu

$\lambda=0,0268 \text{ W/mK}$ – koeficijent toplinske vodljivosti za srednju temperaturu

$c_p=1010,43 \text{ J/kgK}$ – specifični toplinski kapacitet za srednju temperaturu

volumenski protok kroz jednu cijev:

$$q_{vc} = \frac{q_{mc}}{\rho_{4,2bar}} = \frac{0,0295}{5,702} = 0,0052 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.1.31)$$

brzina zraka u cijevi:

$$w = \frac{4 * q_{vc}}{d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 0,00518}{0,02^2 * \pi} = 16,51 \text{ m/s} \quad (5.1.32)$$

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{w * d_u * \rho_{5bar}}{\eta} = \frac{16,51 * 0,02 * 5,702}{21,33 * 10^{-6}} = 88236 \quad (5.1.33)$$

prema (2.1.8):

$$Pr = \frac{\eta * c_p}{\lambda} = \frac{21,33 * 10^{-6} * 1010,43}{0,0268} = 0,805 \quad (5.1.34)$$

prema (2.2.4):

$$\begin{aligned} Nu &= 0,021 * Re^{0,8} * Pr^{0,43} = 0,021 * 88236^{0,8} * 0,805^{0,43} \\ &= 173,04 \end{aligned} \quad (5.1.35)$$

prema (2.2.5):

$$\alpha_u = \frac{Nu * \lambda}{d_u} = \frac{173,04 * 0,0268}{0,02} = 231,77 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (5.1.36)$$

5.1.3 Proračun učina prvog stupnja:

koeficijent prolaza topline za vanjsku površinu cijevi:

$$\begin{aligned}
 k_v &= \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_u} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{Cu}} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_v}} \\
 &= \frac{1}{\frac{0,022}{0,02 \cdot 231,77} + \frac{0,022}{2 \cdot 372} \cdot \ln \frac{0,022}{0,02} + \frac{1}{358,06}} \\
 &= 132,59 \text{ W/m}^2\text{K}
 \end{aligned} \tag{5.1.37}$$

bezdimenzijska značajka površine izmjenjivača topline:

$$\begin{aligned}
 \pi_2 &= \frac{k_v \cdot A_0}{C_1} = \frac{k_v \cdot n \cdot L \cdot d_v \cdot \pi}{q_{mu} \cdot c_p} \\
 &= \frac{132,59 \cdot 401 \cdot 2,4 \cdot 0,022 \cdot \pi}{11,85 \cdot 1010,43} = 0,7362
 \end{aligned} \tag{5.1.38}$$

bezdimenzijska značajka toplinskih kapaciteta struja izmjenjivača topline:

$$\pi_3 = \frac{C_1}{C_2} = \frac{q_{mu} \cdot c_{p1}}{q_{mu} \cdot c_{p2}} = \frac{11,85 \cdot 1010,43}{11,85 \cdot 1021,34} = 0,9893 \tag{5.1.39}$$

bezdimenzijska temperaturna značajka protusmjernog izmjenjivača topline:

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \frac{1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_2}}{1 - \pi_3 e^{-(1-\pi_3)\pi_2}} = \frac{1 - e^{-(1-0,9893) \cdot 0,7362}}{1 - 0,9893 \cdot e^{-(1-0,9893) \cdot 0,7362}} \\
 &= 0,4249
 \end{aligned} \tag{5.1.40}$$

temperatura zraka na izlazu iz cijevi izmjenjivača:

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \frac{\vartheta_2' - \vartheta_2''}{\vartheta_2' - \vartheta_1'} \rightarrow \vartheta_2'' = \vartheta_2' - \pi_1 \cdot (\vartheta_2' - \vartheta_1') = 35 - 0,4249 \cdot (35 - 104) \\
 &= 64,32 \text{ °C}
 \end{aligned} \tag{5.1.41}$$

entalpija vlažnog zraka na ulazu [2]:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= 1,015 \cdot \vartheta_2' + x_2 \cdot (2500 + 1,93 \cdot \vartheta_2') \\
 &= 1,015 \cdot 35 + 0,005 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 35) \\
 &= 48,19 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned} \tag{5.1.42}$$

entalpija vlažnog zraka na izlazu:

$$\begin{aligned} h_2 &= 1,015 * \vartheta_2'' + x_2 * (2500 + 1,93 * \vartheta_2'') \\ &= 1,015 * 64,32 + 0,005 * (2500 + 1,93 * 64,32) \\ &= 78,09 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (5.1.43)$$

učin izmjenjivača zrak – zrak:

$$\phi = q_{mu} * (h_2 - h_1) = 11,85 * (78,09 - 48,19) = 354328,94 \text{ W} \quad (5.1.44)$$

temperatura na izlazu iz plašta I. stupnja (ulazna temperatura zraka u plašt II. stupnja. $\vartheta_3 = \vartheta_1''$):

$$\begin{aligned} \phi &= q_{mu} * c_p * (\vartheta_1' - \vartheta_1'') \rightarrow \vartheta_1'' = \vartheta_1' - \frac{\phi}{q_{mu} * c_p} = 104 - \\ \frac{354328,94}{11,85 * 1021,43} &= 74,98 \text{ °C} \end{aligned} \quad (5.1.45)$$

S obzirom da se u izmjenjivaču imamo i križno i protusmjerno strujanje ne može se točno odrediti tip izmjenjivača. Bezdimenzijska značajka π_1 koja je korištena u proračunu se koristi kod protusmjernog izmjenjivača, stoga je potrebno pomoću srednje logaritamske temperaturne razlike izračunati stvarnu vrijednost temperature zraka na izlazu iz plašta.

srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_m &= \frac{\phi}{k_v * A_0} = \frac{\phi}{k_v * n * L * d_v * \pi} \\ &= \frac{351123,86}{132,59 * 401 * 2,4 * 0,022 * \pi} = 39,83 \text{ °C} \end{aligned} \quad (5.1.46)$$

proračun stvarne vrijednosti temperature zraka na izlazu iz plašta ϑ_1'' :

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_4 - \vartheta_3) - (\vartheta_4'' - \vartheta_3'')}{\ln \frac{(\vartheta_4 - \vartheta_3'')}{(\vartheta_4'' - \vartheta_3)}} = 39,83 \text{ °C} \rightarrow \vartheta_1'' = 75,02 \text{ °C} \quad (5.1.47)$$

5.2 Drugi stupanj (zrak-voda)

Za drugi stupanj aparata zadani su ulazni parametri i geometrijske veličine:

$q_{vn}=33000 \text{ m}_n^3/\text{h}$	– protočna količina zraka
$p=5 \text{ bar}$	– proračunski tlak
$\theta_3' = \theta_1''=75,02^\circ\text{C}$	– temperatura na ulazu u plašt
$n=1214$	– broj cijevi u izmjenjivaču
$d_v=0,022 \text{ m}$	– vanjski promjer cijevi
$d_u=0,020 \text{ m}$	– unutarnji promjer cijevi
$\lambda_{Cu}=372 \text{ W/mK}$	– koeficijent toplinske vodljivosti bakra
$D_u=1,21 \text{ m}$	– unutarnji promjer plašta
$D_s=1,194 \text{ m}$	– promjer pregrade
$L_F=5,6 \text{ m}$	– duljina izmjenjivača
$L_M=0,9 \text{ m}$	– razmak između pregrada
$e=0,01 \text{ m}$	– razmak između cijevi
$e_1=0,02225 \text{ m}$	– razmak između plašta aparata i vanjskih cijevi
$N_u=131$	– broj cijevi u uzdužnoj zoni
$H=0,26 \text{ m}$	– visina odsječka segmentne pregrade
$q_m=70,5 \text{ kg/s}$	– protočna masa vode
$\theta_4'=26^\circ\text{C}$	– ulazna temperatura vode u cijevi

5.2.1 Proračun prijelaza topline u plaštu izmjenjivača II. stupnja:

Napomena: proračun se izvodi za srednju temperaturu zraka $\vartheta_{3sred} = \vartheta'_3 = 75,02^\circ\text{C}$

Svojstva zraka za srednju temperaturu [3]:

$\rho_{5bar}=5,054 \text{ kg/m}^3$ – gustoća zraka za srednju temperaturu pri 5 bar

$\eta=23,14 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ – dinamička žilavost zraka za srednju temperaturu

$\lambda=0,0300 \text{ W/mK}$ – koeficijent toplinske vodljivosti zraka za srednju temperaturu

$c_p= 1016,93 \text{ J/kgK}$ – specifični toplinski kapacitet zraka za srednju temperaturu

prema (2.1.5):

$$S_0 = D_u * L_M = 1,2 * 0,9 = 1,09 \text{ m}^2 \quad (5.2.1)$$

prema (2.1.4)

$$L = \frac{d_v * \pi}{2} = \frac{0,022 * \pi}{2} = 0,0345 \text{ m} \quad (5.2.2)$$

protočni volumen zraka u plaštu:

$$q_v = \frac{q_{mu}}{\rho_{4,2bar}} = \frac{42645,33}{5,054 * 3600} = 2,21 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.2.3)$$

prema (2.1.6):

$$w_0 = \frac{q_v}{S_0} = \frac{2,34}{1,09} = 2,15 \text{ m/s} \quad (5.2.4)$$

prema (2.1.25):

$$t_u = \frac{s_u}{d_v} = \frac{0,02771}{0,022} = 1,26 \quad (5.2.5)$$

prema (2.1.24):

$$t_p = \frac{s_p}{d_v} = \frac{0,032}{0,022} = 1,46 \quad (5.2.6)$$

prema (2.1.29):

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 * t_p} = 1 - \frac{\pi}{4 * 1,46} = 0,46 \quad (5.2.7)$$

prema (2.1.7)

$$Re = \frac{w_o * L * \rho}{\psi * \eta} = \frac{2,15 * 0,0345 * 5,054}{0,46 * 23,14 * 10^{-6}} = 35120 \quad (5.2.8)$$

prema (2.1.8):

$$Pr = \frac{\eta * c_p}{\lambda} = \frac{23,14 * 10^{-6} * 1016,93}{0,0300} = 0,783 \quad (5.2.9)$$

prema (2.1.11):

$$\begin{aligned} f_S &= 1 - 2 * \frac{N_U}{N} + 0,654 * \left(\frac{N_U}{N}\right)^{0,32} \\ &= 1 - 2 * \frac{131}{1214} + 0,654 * \left(\frac{131}{1214}\right)^{0,32} = 1,11 \end{aligned} \quad (5.2.10)$$

prema (2.1.14):

$$\begin{aligned} S_B &= (D_U - D_C - e) * L_K = (1,21 - 1,148 - 0,01) * 1 \\ &= 0,052 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5.2.11)$$

prema (2.1.1):

$$\begin{aligned} S_M &= (2 * e_1 + \Sigma e) * L_M = (2 * 0,02225 + 35 * 0,01) * 0,9 \\ &= 0,355 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5.2.12)$$

prema (2.1.13):

$$R_B = \frac{S_B}{S_M} = \frac{0,052}{0,355} = 0,1464 \quad (5.2.13)$$

prema (2.1.12)

$$\begin{aligned} f_B &= \exp\left(-C_B * R_B * \left(1 - \sqrt[3]{Z_B/Z_K}\right)\right) \\ &= \exp\left(-1,35 * 0,1464 * \left(1 - \sqrt[3]{0}\right)\right) = 0,82 \end{aligned} \quad (5.2.14)$$

prema (2.1.18):

$$\begin{aligned}
 S_{LC} &= (N - N_U) * \frac{(d_B^2 - d_v^2) * \pi}{4} \\
 &= (1214 - 131) * \frac{(0,023^2 - 0,022^2) * \pi}{4} \\
 &= 0,038 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{5.2.15}$$

prema (2.1.20):

$$\begin{aligned}
 S_{LPS} &= \frac{(D_U^2 - D_S^2) * \pi}{4} * \frac{360 - \gamma}{360} \\
 &= \frac{(1,21^2 - 1,195^2) * \pi}{4} * \frac{360 - 111,27}{360} \\
 &= 0,0196 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{5.2.16}$$

prema (2.1.19):

$$S_L = S_{LC} + S_{LPS} = 0,038 + 0,0196 = 0,0576 \text{ m}^2 \tag{5.2.17}$$

prema (2.1.17):

$$R_C = \frac{S_{LC}}{S_L} = \frac{0,038}{0,0576} = 0,66 \tag{5.2.18}$$

prema (2.1.21):

$$R_L = \frac{S_L}{S_M} = \frac{0,0576}{0,355} = 0,16 \tag{5.2.19}$$

prema (2.1.16):

$$\begin{aligned}
 f_L &= 0,4 * R_C + (1 - 0,4 * R_C) * \exp(-1,5 * R_L) \\
 &= 0,4 * 0,66 + (1 - 0,4 * 0,66) \\
 &\quad * \exp(-1,5 * 0,16) = 0,8405
 \end{aligned} \tag{5.2.20}$$

prema (2.1.27):

$$f_s = 1 + \frac{2}{3 * t_u} = 1 + \frac{2}{3 * 1,26} = 1,53 \tag{5.2.21}$$

prema (2.1.32):

$$\begin{aligned} Nu_l &= 0,664 * Re^{0,5} * Pr^{1/3} = 0,664 * 35120,16^{0,5} * 0,783^{1/3} \\ &= 114,71 \end{aligned} \quad (5.2.22)$$

prema (2.1.33):

$$\begin{aligned} Nu_t &= \frac{0,037 * Re^{0,8} * Pr}{1 + \frac{2,443}{Re^{0,1}} * (Pr^{2/3} - 1)} = \frac{0,037 * 35120^{0,8} * 0,783}{1 + \frac{2,443}{35120^{0,1}} * (0,783^{2/3} - 1)} \\ &= 144,06 \end{aligned} \quad (5.2.23)$$

prema (2.1.31):

$$\begin{aligned} Nu_c &= [0,3 + (Nu_t^2 + Nu_l^2)^{0,5}] * f_Q \\ &= [0,3 + (114,71^2 + 144,06^2)^{0,5}] * 1 = 184,45 \end{aligned} \quad (5.2.24)$$

prema (2.1.22):

$$Nu_{SG} = f_S * Nu_c = 1,53 * 184,45 = 282,05 \quad (5.2.25)$$

prema (2.1.10):

$$f_A = f_S * f_B * f_L = 1,11 * 0,82 * 0,84 = 0,77 \quad (5.2.26)$$

prema (2.1.9):

$$Nu = f_A * Nu_{SG} = 0,77 * 282,05 = 214,95 \quad (5.2.27)$$

prema (2.1.35):

$$\alpha_v = \frac{Nu * \lambda}{L} = \frac{214,95 * 0,0300}{0,355} = 186,99 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (5.2.28)$$

5.2.2 Proračun prijelaza topline u cijevima izmjenjivača II. stupnja:

Napomena: proračun se izvodi za pretpostavljenu srednju temperaturu vode $\vartheta_{4sred} = \vartheta_4$

protočna masa vode kroz jednu cijev:

$$q_{mc} = \frac{q_m}{n} = \frac{70,5}{1214} = 0,058 \text{ kg/s} \quad (5.2.29)$$

Svojstva vode za srednju temperaturu [3]:

$\rho=997,244 \text{ kg/m}^3$ – gustoća vode za srednju temperaturu

$\eta=792 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ – dinamička žilavost vode za srednju temperaturu

$\lambda=0,609 \text{ W/mK}$ – koeficijent toplinske vodljivosti vode za srednju temperaturu

$c_w=4176,53 \text{ J/kgK}$ – specifični toplinski kapacitet vode za srednju temperaturu

volumenski protok kroz jednu cijev:

$$q_{vc} = \frac{q_{mc}}{\rho} = \frac{0,058}{997,244} = 5,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.2.30)$$

brzina vode u cijevi:

$$w = \frac{4 \cdot q_{vc}}{d_u^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 5,82 \cdot 10^{-5}}{0,02^2 \cdot \pi} = 0,185 \text{ m/s} \quad (5.2.31)$$

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{w \cdot d_u \cdot \rho}{\eta} = \frac{0,185 \cdot 0,02 \cdot 997,244}{792 \cdot 10^{-6}} = 4472 \quad (5.2.32)$$

prema (2.1.8) :

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_w}{\lambda} = \frac{792 \cdot 10^{-6} \cdot 4176,53}{0,609} = 5,71 \quad (5.2.33)$$

prema (2.2.3):

$$f_G = 1 + \left(\frac{d_u}{L}\right)^{2/3} = 1 + \left(\frac{0,02}{5,6}\right)^{2/3} = 1,023 \quad (5.2.34)$$

prema (2.2.2):

$$\begin{aligned}Nu &= 0,0235 * (Re^{0,8} - 230) * (1,8 * Pr^{0,3} - 0,8) * f_G * f_Q \\&= 0,0235 * (4472^{0,8} - 230) \\&* (1,8 * 5,71^{0,3} - 0,8) * 1,023 * 1 = 32,42\end{aligned}\tag{5.2.35}$$

prema (2.2.5):

$$\alpha_u = \frac{Nu * \lambda}{d_u} = \frac{32,42 * 0,609}{0,02} = 979,39 \text{ W/m}^2\text{K}\tag{5.2.36}$$

5.2.3 Proračun učina drugog stupnja:

koeficijent prolaza topline za vanjsku površinu cijevi:

$$\begin{aligned}
 k_v &= \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_u} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{Cu}} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_v}} \\
 &= \frac{1}{\frac{0,022}{0,02 \cdot 979,39} + \frac{0,022}{2 \cdot 372} \cdot \ln \frac{0,022}{0,02} + \frac{1}{186,99}} \\
 &= 154,48 \text{ W/m}^2\text{K}
 \end{aligned} \tag{5.2.37}$$

bezdimenzijska značajka površine izmjenjivača topline:

$$\begin{aligned}
 \pi_2 &= \frac{k_v \cdot A_0}{C_1} = \frac{k_v \cdot n \cdot L \cdot d_v \cdot \pi}{q_{mu} \cdot c_p} \\
 &= \frac{154,48 \cdot 1214 \cdot 5,6 \cdot 0,022 \cdot \pi}{11,85 \cdot 1016,93} = 6,0199
 \end{aligned} \tag{5.2.38}$$

bezdimenzijska značajka toplinskih kapaciteta struja izmjenjivača topline:

$$\pi_3 = \frac{C_1}{C_2} = \frac{q_{mu} \cdot c_{p1}}{q_{mu} \cdot c_{p2}} = \frac{11,85 \cdot 1016,93}{70,5 \cdot 4176,53} = 0,0409 \tag{5.2.39}$$

bezdimenzijska temperaturna značajka protusmjernog izmjenjivača topline:

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \frac{1 - e^{-(1-\pi_3)\pi_2}}{1 - \pi_3 e^{-(1-\pi_3)\pi_2}} = \frac{1 - e^{-(1-0,0409) \cdot 6,0199}}{1 - 0,0409 \cdot e^{-(1-0,0409) \cdot 6,0199}} \\
 &= 0,997
 \end{aligned} \tag{5.2.40}$$

temperatura zraka na izlazu iz plašta izmjenjivača:

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \frac{\vartheta'_3 - \vartheta''_3}{\vartheta'_3 - \vartheta'_4} \rightarrow \vartheta''_3 = \vartheta'_3 - \pi_1 \cdot (\vartheta'_3 - \vartheta'_4) = 74,99 - 0,997 \cdot \\
 &(74,99 - 26) = 26,14 \text{ °C}
 \end{aligned} \tag{5.2.41}$$

entalpija vlažnog zraka na ulazu [2]:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= 1,015 \cdot \vartheta'_3 + x_1 \cdot (2500 + 1,93 \cdot \vartheta'_3) \\
 &= 1,015 \cdot 74,99 + 0,027 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 74,99) \\
 &= 147,52 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned} \tag{5.2.42}$$

entalpija vlažnog zraka na izlazu:

$$\begin{aligned}
 h_2 &= 1,015 * \vartheta_3'' + x_s * (2500 + 1,93 * \vartheta_3'') + (x_1 - x_s) * 4187 \\
 &\quad * \vartheta_3'' \\
 &= 1,015 * 26,14 + 0,005 * (2500 + 1,93 * 26,14) \\
 &\quad + (0,027 - 0,005) * 4187 * 26,14 = 41,69 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned} \tag{5.2.43}$$

učin izmjenjivača zrak – voda:

$$\phi = q_{mu} * (h_1 - h_2) = 11,85 * (147,52 - 41,69) = 1253,99 \text{ kW} \tag{5.2.44}$$

temperatura vode na izlazu iz cijevi II. stupnja :

$$\begin{aligned}
 \phi &= q_{mu} * c_w * (\vartheta_4'' - \vartheta_4') \quad \rightarrow \quad \vartheta_4'' = \vartheta_4' + \frac{\phi}{q_{mu} * c_w} = 26 + \\
 \frac{1253,99 * 1000}{70,5 * 4176,53} &= 30,26 \text{ °C}
 \end{aligned} \tag{5.2.45}$$

S obzirom da se u izmjenjivaču imamo i križno i protusmjerno strujanje ne može se točno odrediti tip izmjenjivača. Bezdimenzijska značajka π_1 koja je korištena u proračunu se koristi kod protusmjernog izmjenjivača, stoga je potrebno pomoću srednje logaritamske temperaturne razlike izračunati stvarnu vrijednost temperature zraka na izlazu iz plašta.

srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\begin{aligned}
 \Delta\vartheta_m &= \frac{\phi}{k_v * A_0} = \frac{\phi}{k_v * n * L * d_v * \pi} \\
 &= \frac{1253,99 * 1000}{154,48 * 1214 * 5,6 * 0,022 * \pi} = 17,29 \text{ °C}
 \end{aligned} \tag{5.2.46}$$

Proračun stvarne vrijednosti temperature vode na izlazu iz plašta ϑ_4'' :

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_3 - \vartheta_4') - (\vartheta_3'' - \vartheta_4'')}{\ln \frac{(\vartheta_3 - \vartheta_4')}{(\vartheta_3'' - \vartheta_4'')}} = 17,29 \rightarrow \vartheta_4'' = 30,31 \text{ °C} \tag{5.2.47}$$

5.3 Rezultati

Iterativnim postupkom dobiveni su sljedeći rezultati:

Prvi stupanj:

$$\vartheta_1'' = 71,73 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_v = 363,64 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\vartheta_2' = 29,84 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\vartheta_2'' = 62,14 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_u = 248,53 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$k_v = 139,29 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\emptyset = 387,75 \text{ kW}$$

Drugi stupanj:

$$\vartheta_3' = \vartheta_1'' = 71,73 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\vartheta_3'' = \vartheta_2' = 29,84 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_v = 189,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\vartheta_4'' = 29,97 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_u = 982,34 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$k_v = 156,07 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\emptyset = 1163,84 \text{ kW}$$

6 PRORAČUN PADA TLAKA ZA OBA IZMJENJIVAČA

Na temelju zadanih dimenzija aparata i konstrukcijskih parametara izračunati su padovi tlaka. Pad tlaka u plaštu je izračunat kao zbroj pojedinačnih padova tlaka. Takav način proračunavanja predstavlja veliku prednost pri konstrukciji novog izmjenjivača jer omogućuje da se odmah uoči koji od pojedinih padova tlaka je mjerodavan za ukupni pad tlaka, te se promjenom konstrukcije može utjecati na promjenu istog.

Prema jednadžbama iz poglavlja broj 3 proveden je proračun pada tlaka izmjenjivača izmjenjivača prvog stupnja (zrak-zrak) i drugog stupnja (zrak-voda). S obzirom na poznavanje svih relevantnih parametara proračun nije bilo potrebno izvoditi iterativno (za razliku od proračuna učina izmjenjivača).

Napomena: U proračunu pada tlaka pojavljuju se faktori koji su se izračunali u prethodnom poglavlju, stoga nisu ponovno računati u proračunu pada tlaka.

6.1 Prvi stupanj (zrak-zrak)

Za prvi stupanj aparata zadani su ulazni parametri i geometrijske veličine:

$D_u=0,7$ m	– unutarnji promjer plašta
$D_s=0,698$ m	– promjer pregrade
$d_u=0,020$ m	– unutarnji promjer cijevi
$d_p=0,486$ m	– unutarnji promjer priključka
$H=0,238$ m	– visina odsječka segmentne pregrade
$L_M=0,706$ m	– razmak između pregrada
$L_k=0,847$ m	– razmak između pregrade i cijevne stjenke
$z_k=13,5$	– broj poprečno nastrojanih redova u krajnjoj zoni
$z_p=8$	– broj poprečno nastrojanih redova u međuzoni
$z_s=2$	– broj pregrada
$k=0,0015$ mm	– hrapavost cijevi
$\xi_{pr}=2$	– faktor trenja priključka
$\xi_u=0,5$	– faktor trenja na ulazu
$\xi_f=1$	– faktor trenja na izlazu

Napomena: Prikaz smještaja pregrada prvog stupnja se nalazi u prilogu

6.1.1 Pad tlaka u plaštu izmjenjivača prvog stupnja

Pad tlaka u priključku:

brzina zraka u priključku:

$$w_{pr} = \frac{4 * q_v}{d_{pr}^2 * \pi} = \frac{4 * 2,42}{0,486^2 * \pi} = 13,06 \text{ m/s} \quad (6.1.1)$$

prema (3.1.2):

$$\Delta p_{pr} = \xi_{pr} * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} = 2 * \frac{4,89 * 13,06^2}{2} = 834,88 \text{ N/m}^2 \quad (6.1.2)$$

Pad tlaka u krajnjoj zoni:

prema (2.1.1):

$$\begin{aligned} S_K &= (2 * e_1 + \Sigma e) * L_K = (2 * 0,02225 + 20 * 0,01) * 0,847 \\ &= 0,211 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (6.1.3)$$

brzina zraka u krajnjoj zoni:

$$w_{kr} = \frac{q_v}{S_K} = \frac{2,42}{0,211} = 11,43 \text{ m/s} \quad (6.1.4)$$

prema (2.1.14) i (5.1.13):

$$S_B = 0,0152 \text{ m}^2 \quad (6.1.5)$$

prema (2.1.1) i (5.1.14):

$$S_M = 0,1765 \text{ m} \quad (6.1.6)$$

prema (2.1.13) i (5.1.15):

$$R_B = 0,0864 \quad (6.1.7)$$

prema (2.1.12):

$$\begin{aligned} f_B &= \exp\left(-C_B * R_B * \left(1 - \sqrt[3]{Z_B/Z_K}\right)\right) \\ &= \exp\left(-3,7 * 0,0864 * \left(1 - \sqrt[3]{0}\right)\right) = 0,7264 \end{aligned} \quad (6.1.8)$$

prema (2.1.24) i (5.1.8):

$$t_p = 1,46 \quad (6.1.9)$$

prema (2.1.25) i (5.1.7):

$$t_u = 1,26 \quad (6.1.10)$$

prema (3.1.16):

$$\begin{aligned} F_{s,t} &= 2,5 + \frac{1,2}{(t_p - 0,85)^{1,06}} + 0,4 * [(t_u/t_p) - 1]^3 - 0,01 \\ &\quad * [(t_p/t_u) - 1]^3 \\ &= 2,5 + \frac{1,2}{(1,46 - 0,85)^{1,06}} + 0,4 \\ &\quad * [(1,26/1,46) - 1]^3 - 0,01 * [(1,46/1,26) - 1]^3 \\ &= 4,5448 \end{aligned} \quad (6.1.11)$$

prema (3.1.15):

$$\xi_{s,t} = \frac{F_{s,t}}{Re^{0,25}} = \frac{4,5448}{82475^{0,25}} = 0,2682 \quad (6.1.12)$$

prema (3.1.11):

$$t = t_p = 1,46 \quad (6.1.13)$$

prema (3.1.8):

$$\begin{aligned} F_{p,l} &= \frac{280 * (\sqrt{t_u} - 0,6)^2 + 210}{\left[\frac{4 * t_p * t_u}{\pi} - 1 \right] * t^{1,6}} = \frac{280 * (\sqrt{1,26} - 0,6)^2 + 210}{\left[\frac{4 * 1,46 * 1,26}{\pi} - 1 \right] * 1,46^{1,6}} \\ &= 117,89 \end{aligned} \quad (6.1.14)$$

prema (3.1.14):

$$\xi_{s,l} = \xi_{p,l} = \frac{F_{p,l}}{Re} = \frac{117,89}{82475} = 0,0014 \quad (6.1.15)$$

prema (3.1.13):

$$\begin{aligned}\xi_s &= \xi_{s,l} + \xi_{s,t} * \left[1 - \exp \left(-\frac{200 + Re}{1000} \right) \right] \\ &= 0,0014 + 0,2682 * \left[1 - \exp \left(-\frac{200 + 82475}{1000} \right) \right] \\ &= 0,2696\end{aligned}\quad (6.1.16)$$

prema (3.1.5):

$$\begin{aligned}\Delta p_{i,k} &= \xi_{i,k} * z_k * \frac{\rho * w_{kr}^2}{2} = 0,2696 * 13,5 * \frac{4,89 * 11,43^2}{2} \\ &= 1164,96 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.1.17)$$

prema (3.1.4):

$$\begin{aligned}\Delta p_{1,k} &= f_B * \Delta p_{i,k} = f_B * \Delta p_{i,k} = 0,7264 * 1164,96 \\ &= 846,27 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.1.18)$$

prema (3.1.3):

$$\Delta p_k = 2 * \Delta p_{1,k} = 2 * 846,27 = 1692,53 \text{ N/m}^2 \quad (6.1.19)$$

Pad tlaka u međuzoni:

brzina zraka u međuzoni:

$$w_m = \frac{q_v}{S_m} = \frac{2,42}{0,1765} = 14,35 \text{ m/s} \quad (6.1.20)$$

prema (2.1.20) i (5.1.18):

$$S_{LPS} = 0,0013 \text{ m}^2 \quad (6.1.21)$$

prema (2.1.18) i (5.1.17):

$$S_{LC} = 0,0113 \text{ m}^2 \quad (6.1.22)$$

prema (2.1.19) i (5.1.19):

$$S_L = 0,0126 \text{ m}^2 \quad (6.1.23)$$

prema (3.19.20):

$$R_p = \frac{S_{LPS}}{S_L} = \frac{0,00113}{0,0126} = 0,1048 \quad (6.1.24)$$

prema (2.1.21) i (5.1.21):

$$R_L = 0,0715 \quad (6.1.25)$$

prema (3.1.18):

$$\begin{aligned} f_L &= \exp \left[-1,33 * (1 + R_p) * R_L^{(0,65-0,15*R_p)} \right] \\ &= \exp \left[-1,33 * (1 + 0,1048) \right. \\ &\quad \left. * 0,0715^{(0,65-0,15*0,1048)} \right] = 0,7589 \end{aligned} \quad (6.1.26)$$

prema (3.1.13) i (6.1.16):

$$\xi_{i,m} = \xi_s = 0,2696 \quad (6.1.27)$$

prema (3.1.20):

$$\begin{aligned} \Delta p_{i,m} &= \xi_{i,m} * z_p * \frac{\rho * w_m^2}{2} = 0,2696 * 8 * \frac{4,89 * 14,35^2}{2} \\ &= 993,63 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (6.1.28)$$

prema (3.1.17):

$$\begin{aligned} \Delta p_m &= (z_s - 1) * f_L * f_B * \Delta p_{i,m} \\ &= (2 - 1) * 0,7589 * 0,2696 * 993,63 \\ &= 547,83 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (6.1.29)$$

Pad tlaka u uzdužnoj zoni:

prema (2.1.3):

$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 * H}{D_s} \right) = 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 * 0,238}{0,698} \right) = 143,39^\circ \quad (6.1.30)$$

prema (2.1.2):

$$\begin{aligned}
 S_U &= \frac{D_U^2}{8} * \left(\frac{\gamma * \pi}{180} - \sin \gamma \right) - Nu * \frac{d_v^2 * \pi}{4} \\
 &= \frac{0,7^2}{8} * \left(\frac{143,39 * \pi}{180} - \sin 143,39 \right) - 81 \\
 &\quad * \frac{0,022^2 * \pi}{4} = 0,0849 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{6.1.31}$$

slobodni poprečni presjek:

$$S = \sqrt{S_M * S_U} = \sqrt{0,1765 * 0,0849} = 0,1224 \text{ m}^2 \tag{6.1.32}$$

brzina zraka u uzdužnoj zoni:

$$w_u = \frac{q_v}{S} = \frac{2,42}{0,1224} = 20,69 \text{ m/s} \tag{6.1.33}$$

prema (3.1.26):

$$\begin{aligned}
 d_h &= \frac{4 * S_u}{Nu * d_v * \pi + \frac{D_u * \pi * \gamma}{360} + D_u * \sin \frac{\gamma}{2}} \\
 &= \frac{4 * 0,0849}{81 * 0,022 * \pi + \frac{0,7 * \pi * 143,39}{360} + 0,7 * \sin \frac{143,39}{2}} \\
 &= 0,0489 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{6.1.34}$$

prema (3.1.24):

$$Re_1 = \frac{w * \rho * e}{\eta} = \frac{20,69 * 4,89 * 0,01}{1,93 * 10^{-5}} = 44562 \tag{6.1.35}$$

prema (3.1.25):

$$Re_2 = \frac{w * \rho * d_h}{\eta} = \frac{20,69 * 4,89 * 0,0489}{1,93 * 10^{-5}} = 217840 \tag{6.1.36}$$

prema (3.1.27):

$$z_u = 0,8 * \frac{H}{S_u} = 0,8 * \frac{0,2378}{0,0849} = 2,24 \tag{6.1.37}$$

prema (3.1.23):

$$\begin{aligned}\Delta p_t &= (0,6 * z_u + 2) * \frac{\rho * w^2}{2} = (0,6 * 2,24 + 2) * \frac{4,89 * 20,69^2}{2} \\ &= 3201,58 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.1.38)$$

prema (3.1.22):

$$\begin{aligned}\Delta p_l &= \left(\frac{56 * z_u}{Re_1} + \frac{52 * L_M}{d_h * Re_2} + 2 \right) * \frac{\rho * w^2}{2} \\ &= \left(\frac{56 * 2,24}{44562} + \frac{52 * 0,706}{0,0489 * 217840} + 2 \right) \\ &\quad * \frac{4,89 * 20,69^2}{2} = 1920,79 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.1.39)$$

prema (3.1.21):

$$\begin{aligned}\Delta p_u &= z_s * F * f_L * \sqrt{\Delta p_l^2 + \Delta p_t^2} \\ &= 2 * 1 * 0,7589 * \sqrt{1920,79^2 + 3201,58^2} \\ &= 5667,32 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.1.40)$$

prema (3.1.1):

$$\begin{aligned}\Delta p &= \Delta p_{pr} + \Delta p_{kr} + \Delta p_m + \Delta p_u \\ &= 834,88 + 1692,53 + 547,83 + 5667,32 \\ &= 8742,56 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.1.41)$$

6.1.2 Pad tlaka u cijevima izmjenjivača

Pad tlaka na ulazu i izlazu u konusni plašt:

brzina zraka u priključku:

$$w_{pr} = \frac{4 * q_v}{d_{pr}^2 * \pi} = \frac{4 * 2,42}{0,5^2 * \pi} = 12,34 \text{ m/s} \quad (6.1.42)$$

prema (3.2.2)

$$\Delta p_{pu} = \xi_u * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} = 0,5 * \frac{4,89 * 12,34^2}{2} = 210,20 \text{ N/m}^2 \quad (6.1.43)$$

prema (3.2.2)

$$\Delta p_{pi} = \xi_i * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} = 1 * \frac{4,89 * 12,34^2}{2} = 420,40 \text{ N/m}^2 \quad (6.1.44)$$

Pad tlaka na ulazu i izlazu u cijevni snop:

prema (5.1.32):

$$w = 17,05 \text{ m/s} \quad (6.1.45)$$

prema (3.2.2)

$$\Delta p_{pu} = \xi_u * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} = 0,5 * \frac{4,89 * 17,05^2}{2} = 401,13 \text{ N/m}^2 \quad (6.1.46)$$

prema (3.2.2)

$$\Delta p_{pi} = \xi_i * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} = 1 * \frac{4,89 * 17,05^2}{2} = 802,27 \text{ N/m}^2 \quad (6.1.47)$$

Pad tlaka u cijevnom snopu:

prema (3.2.4):

$$\varepsilon = \frac{k}{d_u} = \frac{0,0015}{20} = 0,000075 \quad (6.1.48)$$

prema (3.2.5):

$$\xi = f(Re, \varepsilon) = f(97525,24,0,000075) = 0,018 \text{ [4]} \quad (6.1.49)$$

prema (3.2.3):

$$\begin{aligned} \Delta p_c &= \xi * \frac{L}{d_u} * \frac{\rho * w^2}{2} = 0,018 * \frac{2,4}{0,02} * \frac{4,89 * 17,05^2}{2} \\ &= 1732,9 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (6.1.50)$$

prema (3.2.1):

$$\begin{aligned} \Delta p_{cs} &= \Delta p_{pi} + \Delta p_{pu} + \Delta p_{pu} + \Delta p_{pi} + \Delta p_c \\ &= 210,20 + 420,40 + 401,13 + 802,26 + 1732,9 \\ &= 3566,89 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (6.1.51)$$

6.2 Drugi stupanj (zrak-voda)

Za drugi stupanj aparata zadani su ulazni parametri i geometrijske veličine:

$D_u=1,21$ m	– unutarnji promjer plašta
$D_s=1,194$ m	– promjer pregrade
$d_u=0,020$ m	– unutarnji promjer cijevi
$d_p=0,486$ m	– unutarnji promjer priključka
$H=0,26$ m	– visina odsječka segmentne pregrade
$L_M=0,9$ m	– razmak između pregrada
$L_k=1$ m	– razmak između pregrade i cijevne stjenke
$z_k=34,5$	– broj poprečno nastrujanih redova u krajnjoj zoni
$z_p=18$	– broj poprečno nastrujanih redova u međuzoni
$z_s=5$	– broj pregrada
$k=0,0015$ mm	– hrapavost cijevi
$\xi_{pr}=2$	– faktor trenja priključka
$\xi_u=0,5$	– faktor trenja na ulazu
$\xi_i=1$	– faktor trenja na izlazu

Napomena: Prikaz smještaja pregrada drugog stupnja se nalazi u prilogu

6.2.1 Pad tlaka u plaštu izmjenjivača drugog stupnja

Pad tlaka u priključku:

brzina zraka u priključku:

$$w_{pr} = \frac{4 * q_v}{d_{pr}^2 * \pi} = \frac{4 * 2,18}{0,486^2 * \pi} = 11,74 \text{ m/s} \quad (6.2.1)$$

prema (3.1.2):

$$\Delta p_{pr} = \xi_{pr} * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} = 2 * \frac{5,44 * 11,74^2}{2} = 750,41 \text{ N/m}^2 \quad (6.2.2)$$

Pad tlaka u krajnjoj zoni:

prema (2.1.1):

$$\begin{aligned} S_K &= (2 * e_1 + \Sigma e) * L_K = (2 * 0,02225 + 35 * 0,01) * 1 \\ &= 0,33 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (6.2.3)$$

brzina zraka u krajnjoj zoni:

$$w_{kr} = \frac{q_v}{S_K} = \frac{2,18}{0,33} = 6,59 \text{ m/s} \quad (6.2.4)$$

prema (2.1.14) i (5.2.11):

$$S_B = 0,052 \text{ m}^2 \quad (6.2.5)$$

prema (2.1.1) i (5.2.12):

$$S_M = 0,355 \text{ m} \quad (6.2.6)$$

prema (2.1.13) i (5.1.15):

$$R_B = 0,1464 \quad (6.2.7)$$

prema (2.1.12):

$$\begin{aligned} f_B &= \exp\left(-C_B * R_B * \left(1 - \sqrt[3]{Z_B/Z_K}\right)\right) \\ &= \exp\left(-3,7 * 0,1464 * \left(1 - \sqrt[3]{0}\right)\right) = 0,5817 \end{aligned} \quad (6.2.8)$$

prema (2.1.24) i (5.2.6):

$$t_p = 1,46 \quad (6.2.9)$$

prema (2.1.25) i (5.2.5):

$$t_u = 1,26 \quad (6.2.10)$$

prema (3.1.16):

$$\begin{aligned} F_{s,t} &= 2,5 + \frac{1,2}{(t_p - 0,85)^{1,06}} + 0,4 * [(t_u/t_p) - 1]^3 - 0,01 \\ &\quad * [(t_p/t_u) - 1]^3 \\ &= 2,5 + \frac{1,2}{(1,46 - 0,85)^{1,06}} + 0,4 \\ &\quad * [(1,26/1,46) - 1]^3 - 0,01 * [(1,46/1,26) - 1]^3 \\ &= 4,5448 \end{aligned} \quad (6.2.11)$$

prema (3.1.15):

$$\xi_{s,t} = \frac{F_{s,t}}{Re^{0,25}} = \frac{4,5448}{42121,57^{0,25}} = 0,3172 \quad (6.2.12)$$

prema (3.1.11):

$$t = t_p = 1,46 \quad (6.2.13)$$

prema (3.1.8):

$$\begin{aligned} F_{p,l} &= \frac{280 * (\sqrt{t_u} - 0,6)^2 + 210}{\left[\frac{4 * t_p * t_u}{\pi} - 1 \right] * t^{1,6}} = \frac{280 * (\sqrt{1,26} - 0,6)^2 + 210}{\left[\frac{4 * 1,46 * 1,26}{\pi} - 1 \right] * 1,46^{1,6}} \\ &= 117,89 \end{aligned} \quad (6.2.14)$$

prema (3.1.14):

$$\xi_{s,l} = \xi_{p,l} = \frac{F_{p,l}}{Re} = \frac{117,89}{42121} = 0,0028 \quad (6.2.15)$$

prema (3.1.13):

$$\begin{aligned}\xi_s &= \xi_{s,l} + \xi_{s,t} * \left[1 - \exp \left(-\frac{200 + Re}{1000} \right) \right] \\ &= 0,0028 + 0,3172 * \left[1 - \exp \left(-\frac{200 + 42121}{1000} \right) \right] \\ &= 0,32\end{aligned}\quad (6.2.16)$$

prema (3.1.5):

$$\begin{aligned}\Delta p_{i,k} &= \xi_{i,k} * z_k * \frac{\rho * w_{kr}^2}{2} = 0,32 * 34,5 * \frac{5,44 * 6,59^2}{2} \\ &= 1307,82 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.2.17)$$

prema (3.1.4):

$$\begin{aligned}\Delta p_{1,k} &= f_B * \Delta p_{i,k} = f_B * \Delta p_{i,k} = 0,5817 * 1307,82 \\ &= 760,69 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.2.18)$$

prema (3.1.3):

$$\Delta p_k = 2 * \Delta p_{1,k} = 2 * 760,69 = 1521,38 \text{ N/m}^2 \quad (6.2.19)$$

Pad tlaka u međuzoni:

brzina zraka u međuzoni:

$$w_m = \frac{q_v}{S_m} = \frac{2,18}{0,355} = 7,33 \text{ m/s} \quad (6.2.20)$$

prema (2.1.20) i (5.2.16):

$$S_{LPS} = 0,0196 \text{ m}^2 \quad (6.2.21)$$

prema (2.1.18) i (5.2.15):

$$S_{LC} = 0,038 \text{ m}^2 \quad (6.2.22)$$

prema (2.1.19) i (5.2.17):

$$S_L = 0,0576 \text{ m}^2 \quad (6.2.23)$$

prema (3.19.20):

$$R_p = \frac{S_{LPS}}{S_L} = \frac{0,0196}{0,0576} = 0,3386 \quad (6.2.24)$$

prema (2.1.21) i (5.2.19):

$$R_L = 0,1629 \quad (6.2.25)$$

prema (3.1.18):

$$\begin{aligned} f_L &= \exp \left[-1,33 * (1 + R_p) * R_L^{(0,65 - 0,15 * R_p)} \right] \\ &= \exp \left[-1,33 * (1 + 0,3386) \right. \\ &\quad \left. * 0,1629^{(0,65 - 0,15 * 0,1629)} \right] = 0,5487 \end{aligned} \quad (6.2.26)$$

prema (3.1.13) i (6.2.16):

$$\xi_{i,m} = \xi_s = 0,32 \quad (6.2.27)$$

prema (3.1.20):

$$\begin{aligned} \Delta p_{i,m} &= \xi_{i,m} * z_p * \frac{\rho * w_m^2}{2} = 0,32 * 18 * \frac{5,44 * 7,33^2}{2} \\ &= 842,39 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (6.2.28)$$

prema (3.1.17):

$$\begin{aligned} \Delta p_m &= (z_s - 1) * f_L * f_B * \Delta p_{i,m} \\ &= (5 - 1) * 0,5487 * 0,5187 * 842,39 \\ &= 1075,16 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (6.2.29)$$

Pad tlaka u uzdužnoj zoni:

prema (2.1.3):

$$\gamma = 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 * H}{D_s} \right) = 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2 * 0,26}{1,194} \right) = 111,27^\circ \quad (6.2.30)$$

prema (2.1.2):

$$\begin{aligned}
 S_U &= \frac{D_U^2}{8} * \left(\frac{\gamma * \pi}{180} - \sin \gamma \right) - Nu * \frac{d_v^2 * \pi}{4} \\
 &= \frac{1,21^2}{8} * \left(\frac{111,27 * \pi}{180} - \sin 111,27 \right) - 131 \\
 &\quad * \frac{0,022^2 * \pi}{4} = 0,135 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{6.2.31}$$

slobodni poprečni presjek:

$$S = \sqrt{S_M * S_U} = \sqrt{0,355 * 0,135} = 0,2 \text{ m}^2 \tag{6.2.32}$$

brzina zraka u uzdužnoj zoni:

$$w_u = \frac{q_v}{S} = \frac{2,18}{0,2} = 10,9 \text{ m/s} \tag{6.2.33}$$

prema (3.1.26):

$$\begin{aligned}
 d_h &= \frac{4 * S_u}{Nu * d_v * \pi + \frac{D_u * \pi * \gamma}{360} + D_u * \sin \frac{\gamma}{2}} \\
 &= \frac{4 * 0,135}{131 * 0,022 * \pi + \frac{1,21 * \pi * 111,27}{360} + 1,21 * \sin \frac{111,27}{2}} \\
 &= 0,048 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{6.2.34}$$

prema (3.1.24):

$$Re_1 = \frac{w * \rho * e}{\eta} = \frac{10,9 * 5,44 * 0,01}{1,93 * 10^{-5}} = 30678 \tag{6.2.35}$$

prema (3.1.25):

$$Re_2 = \frac{w * \rho * d_h}{\eta} = \frac{10,9 * 5,44 * 0,048}{1,93 * 10^{-5}} = 147383 \tag{6.2.36}$$

prema (3.1.27):

$$z_u = 0,8 * \frac{H}{S_u} = 0,8 * \frac{0,26}{0,135} = 1,54 \tag{6.2.37}$$

prema (3.1.23):

$$\begin{aligned}\Delta p_t &= (0,6 * z_u + 2) * \frac{\rho * w^2}{2} = (0,6 * 1,54 + 2) * \frac{5,44 * 10,9^2}{2} \\ &= 942,09 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.2.38)$$

prema (3.1.22):

$$\begin{aligned}\Delta p_l &= \left(\frac{56 * z_u}{Re_1} + \frac{52 * L_M}{d_h * Re_2} + 2 \right) * \frac{\rho * w^2}{2} \\ &= \left(\frac{56 * 1,54}{30678} + \frac{52 * 0,9}{0,048 * 147383} + 2 \right) \\ &\quad * \frac{5,44 * 10,9^2}{2} = 647,12 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.2.39)$$

prema (3.1.21):

$$\begin{aligned}\Delta p_u &= z_s * F * f_L * \sqrt{\Delta p_l^2 + \Delta p_t^2} \\ &= 5 * 1 * 0,5487 * \sqrt{647,12^2 + 942,09^2} \\ &= 3134,94 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.2.40)$$

prema (3.1.1):

$$\begin{aligned}\Delta p &= \Delta p_{pr} + \Delta p_{kr} + \Delta p_m + \Delta p_u \\ &= 750,41 + 1521,38 + 1075,16 + 3134,94 \\ &= 6481,89 \text{ N/m}^2\end{aligned}\quad (6.2.41)$$

6.2.2 Pad tlaka u cijevima izmjenjivača

Pad tlaka na ulazu i izlazu u konusni plašt:

brzina vode u priključku:

$$w_{pr} = \frac{4 * q_v}{d_{pr}^2 * \pi} = \frac{4 * 2,18}{0,3^2 * \pi} = 1,01 \text{ m/s} \quad (6.2.42)$$

prema (3.2.2)

$$\Delta p_{pu} = \xi_u * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} = 0,5 * \frac{5,18 * 1,01^2}{2} = 249,74 \text{ N/m}^2 \quad (6.2.43)$$

prema (3.2.2)

$$\Delta p_{pi} = \xi_i * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} = 1 * \frac{5,18 * 1,01^2}{2} = 499,48 \text{ N/m}^2 \quad (6.2.44)$$

Pad tlaka na ulazu i izlazu u cijevni snop:

prema (5.2.31):

$$w = 0,185 \text{ m/s} \quad (6.2.45)$$

prema (3.2.2)

$$\Delta p_{pu} = \xi_u * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} = 0,5 * \frac{5,18 * 0,185^2}{2} = 8,58 \text{ N/m}^2 \quad (6.2.46)$$

prema (3.2.2)

$$\Delta p_{pi} = \xi_i * \frac{\rho * w_{pr}^2}{2} = 1 * \frac{5,18 * 0,185^2}{2} = 17,16 \text{ N/m}^2 \quad (6.2.47)$$

Pad tlaka u cijevnom snopu:

prema (3.2.4):

$$\varepsilon = \frac{k}{d_u} = \frac{0,0015}{20} = 0,000075 \quad (6.2.48)$$

prema (3.2.5):

$$\xi = f(Re, \varepsilon) = f(4472,65; 0,000075) = 0,06 [4] \quad (6.2.49)$$

prema (3.2.3):

$$\begin{aligned} \Delta p_c &= \xi * \frac{L}{d_u} * \frac{\rho * w^2}{2} = 0,06 * \frac{5,6}{0,02} * \frac{5,18 * 0,185^2}{2} \\ &= 288,24 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (6.2.50)$$

prema (3.2.1):

$$\begin{aligned} \Delta p_{cs} &= \Delta p_{pi} + \Delta p_{pu} + \Delta p_{pu} + \Delta p_{pi} + \Delta p_c \\ &= 249,74 + 499,48 + 8,58 + 17,16 + 288,24 \\ &= 1063,2 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (6.2.51)$$

7 PRORAČUN ČVRSTOĆE PREMA NORMI HRN EN 13445

Proračun čvrstoće pojedinih dijelova aparata, prema normi HRN EN 13445, izveden je pomoću programa „Visual Vessel Design“ [5]. Na temelju unesenih geometrijskih parametara, mehaničkih svojstava materijala i radnih parametara program izračunava potrebne debljine stijenki dijelova.

7.1 Materijali izrade

Materijal izrade plašta i podnice izmjenjivača je čelični lim S275JR karakteristika [6],[7]:

$R_m=410 - 560 \text{ N/mm}^2$	- vlačna čvrstoća
$R_e=275 \text{ N/mm}^2$	- granica razvlačenja
$R_{p0,2}=220 \text{ N/mm}^2$	- konvencionalna granica razvlačenja
$A=22 \%$	- istezljivost
$E=210000 \text{ N/mm}^2$	- Youngov modul elastičnosti

Materijal izrade prirubnica izmjenjivača je S235JRG2 karakteristika [5],[6]:

$R_m=340 - 470 \text{ N/mm}^2$	- vlačna čvrstoća
$R_e=235 \text{ N/mm}^2$	- granica razvlačenja
$R_{p0,2}=215 \text{ N/mm}^2$	- konvencionalna granica razvlačenja
$A=26 \%$	- istezljivost
$E=210000 \text{ N/mm}^2$	- Youngov modul elastičnosti

Cijevi cijevnog snopa su od bakra Cu 99,9 Youngovog modula elastičnosti 125000 N/mm^2

7.2 Koeficijent zavora

S obzirom da se aparat podvrgava nerazornim ispitivanjima koeficijent zavora ν iznosi 0,85. [8]

7.3 Hidrostatski ispitni tlak

Kod posuda pod tlakom, hidrostatski ispitni tlak ne smije biti manji od onog koji odgovara maksimalnom opterećenju kojem je oprema podvrgnuta u radu, uzimajući u obzir najveći dozvoljeni tlak i najveću dozvoljenu temperaturu, pomnožen s koeficijentom 1,25 ili najvećeg dozvoljenog tlaka pomnoženog s koeficijentom 1,43. [8]

7.4 Proračun čvrstoće u „Visual Vessel Designu“

7.4.1 Proračun cilindričnog plašta prvog stupnja

Uneseni proračunski parametri:

$D_e=720$ mm	- vanjski promjer cilindričnog plašta
$L_{cy}=2400$ mm	- duljina cilindričnog plašta
$e_n=10$ mm	- debljina stijenke cilindričnog plašta
$\nu=0,85$	- koeficijent zavarenog spoja
$c=0,5$ mm	- dodatak za odstupanje dimenzija materijala
$t_h=1$ mm	- dodatak zbog smanjenja debljine lima korozijom i habanjem

GENERAL DESIGN DATA

PRESSURE LOADING: Design Component for Internal and External Pressure
PROCESS CARD: Shell Side : Temp= 104°C, P= .5MPa, c= .5mm, Pext= .1MPa

SHELL DATA

CYLINDER FABRICATION: Welded Pipe
WELD JOINT COEFFICIENT: Testing Group 3 (z=0.85)
EN 10025-2:2005, 1.0044 S275JR Flat/Long Products THK<=16mm 50'C
Rm=410 Rp=275 Rpt=275 f=170.83 f20=170.83 ftest=261.9 (N/mm2)
NOTE: A PARTICULAR MATERIAL APPRAISAL(PMA) MAY BE REQUIRED FOR THIS MATERIAL.
OUTSIDE DIAMETER OF SHELL.....:De 720.00 mm
LENGTH OF CYLINDRICAL PART OF SHELL.....:Lcyl 2400.00 mm
MODULUS OF ELASTICITY at design temp.....:E 2,0966E05 N/mm2
SAFETY FACTOR (1.0 carbon and 1.25 austenitic steels):s 1.00
AS BUILT WALL THICKNESS (uncorroded).....:en 10.00 mm
NEGATIVE TOLERANCE/THINNING ALLOWANCE.....:th 1.00 mm

7.4.2 - CYLINDRICAL SHELLS UNDER INTERNAL PRESSURE

Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. e_{min} :

$$e_{min} = D_e * P / (2 * f * z + P)$$
(7.4-2)

$$= 720 * 0.5 / (2 * 170.83 * 0.85 + 0.5) =$$
1.24 mm

Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :

$$e_{min} = e_{min} + c + t_h = 1.24 + 0.5 + 1 =$$
2.74 mm

Analysis Thickness

$$e_a = e_n - c - t_h = 10 - 0.5 - 1 =$$
8.50 mm

»7.4.1 Cond.of Applicabilty $e_{min}/D_e=0.0017 \leq 0.16$ » OK«
 »Internal Pressure $e_{min}=2.74 \leq e_n=10[\text{mm}]$ » (U= 27.3%) OK«

EN13445-5;10.2.3.3 REQUIRED MIN.HYDROSTATIC TEST PRESSURE: P_{tmin}

NEW AT AMBIENT TEMP. FOR TEST GROUPS 1, 2 and 3

$$P_{tmin} = 1.25 * P_d * 170.83 / 170.83$$

$$= 1.25 * 0.5 * 170.83 / 170.83 =$$
0.6250 MPa

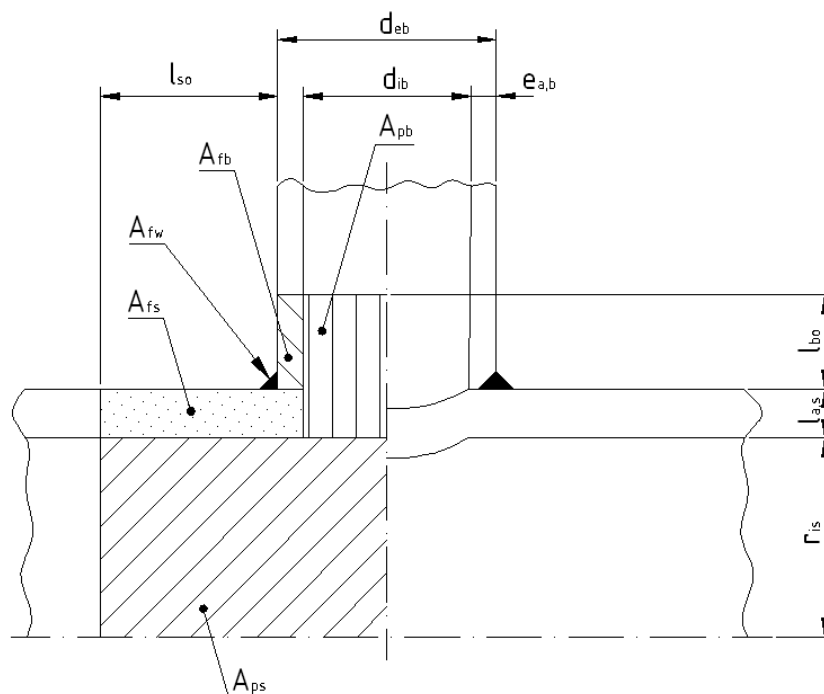
Zadovoljen je uvjet da je proračunata debljina stijenke manja od izvedene:

$$e_{min} (2,74 \text{ mm}) < e_n (10 \text{ mm})$$

7.4.2 Proračun najvećeg izreza cilindričnog plašta prvog stupnja

Uneseni proračunski parametri:

$d_{eb}=508$ mm - vanjski promjer priključka
 $e_{nb}=11$ mm - debljina stijenke priključka



Slika 7. Otvor na cilindričnom plaštu prvog stupnja

NOZZLE DIMENSIONAL DATA

OUTSIDE NOZZLE DIAMETER.....:deb	508.00 mm
AS BUILT NOZZLE THICKNESS (uncorroded).....:enb	11.00 mm

9.5.2.4.4 Nozzles normal to the shell, with or without reinforcement pads.

Calculation of Stress Loaded Areas Effective as Reinforcement

Area of Shell Afs

Limit of Reinforcement Along Shell

$$I_{so} = \text{Sqr}((2 * r_{is} + e_{as}) * e_{as})$$

$$= \text{Sqr}((2 * 351.5 + 8.5) * 8.5) =$$

77.77 mm

Set In Nozzle

$$A_{fs} = e_{as} * I_{s} \quad (9.5-78) = 8.5 * 77.77 =$$

661.02 mm²

Area of Nozzle Afb

Limit of Reinforcement Along Nozzle (outside shell)

$$I_{bo} = \text{MIN}(\text{Sqr}((d_{eb} - e_b) * e_b), h_o) \quad (9.5-75)$$

$$= \text{MIN}(\text{Sqr}((508 - 9.125) * 9.125), 300) =$$

67.47 mm

Set In Nozzle

$$A_{fb} = e_b * (I_{bo} + I_{bi} + e_{as}) \quad (9.5-77) = 9.125 * (67.47 + 0 + 8.5) =$$

693.23 mm²

Calculation of Pressure Loaded Areas

In the Nozzle A_{pb}

$$A_{pb} = 0.5 * d_{ib} * (I_{bo} + e_{as}) \quad (9.5-83) = 0.5 * 489.75 * (67.47 + 8.5) = 18603.21 \text{ mm}^2$$

Cyl.Shell in the Longitudinal Section A_{ps}

$$A_{psL} = r_{is} * (I_s + a) \quad (9.5-93) = 351.5 * (77.77 + 254) = 1,1662E05 \text{ mm}^2$$

Cyl.Shell in the Transverse Cross Section A_{ps}

$$A_{psT} = 0.5 * r_{is}^2 * (I_s + a) / (0.5 * e_{as} + r_{is}) \quad (9.5-104) \\ = 0.5 * 351.5^2 * (77.77 + 282.88) / (0.5 * 8.5 + 351.5) = 62627.01 \text{ mm}^2$$

$$A_{ps} = \text{MAX}(A_{psL}, A_{psT}) = \text{MAX}(1.1662E05, 62627.01) = 1,1662E05 \text{ mm}^2$$

9.5.2 Reinforcement Rules

Pressure Area Required $pA_{(req.)}$

$$pA_{reqL} = P * (A_{psL} + A_{pb}) \quad (9.5-7) = 0.5 * (1.1662E05 + 18603.21) = 67.61 \text{ kN}$$

$$pA_{reqT} = P * (A_{psT} + A_{pb} + 0.5 * A_{phi}) \quad (9.5-7) \\ = 0.5 * (62627.01 + 18603.21 + 0.5 * 0) = 40.62 \text{ kN}$$

$$pA_{req} = \text{MAX}(pA_{reqL}, pA_{reqT}) = \text{MAX}(67.61, 40.62) = 67.61 \text{ kN}$$

Pressure Area Available $pA_{(aval.)}$

$$pA_{aval} = (A_{fs} + A_{fw}) * (f_s - 0.5 * P) + A_{fp} * (f_{op} - 0.5 * P) + A_{fb} * (f_{ob} - 0.5 * P) \quad (9.5-7) \\ = (661.02 + 0) * (170.83 - 0.5 * 0.5) + 0 * (0 - 0.5 * 0.5) + 693.23 * (170.83 - 0.5 * 0.5) = 231.01 \text{ kN}$$

»Nozzle Reinforcement $pA_{aval} = 231.01 > pA_{req} = 67.61 [\text{kN}]$ « » (U= 29.2%) OK«

7.4.3 Proračun konusnog plašta prvog stupnja

Uneseni proračunski parametri:

$D_{iL}=700$ mm	- unutarnji promjer veće baze konusnog plašta
$D_{iS}=500$ mm	- unutarnji promjer manje baze konusnog plašta
$L_c=700$ mm	- duljina konusnog plašta
$e_n=10$ mm	- debljina stijenke konusnog plašta
$\nu=0,85$	- koeficijent zavarenog spoja
$c=0,5$ mm	- dodatak za odstupanje dimenzija materijala
$t_h=1$ mm	- dodatak zbog smanjenja debljine lima korozijom i habanjem

DATA FOR CONE

```
Specify the Total Length of the Conical Section
WELD JOINT COEFFICIENT: Testing Group 3 (z=0.85)
EN 10025-2:2005, 1.0044 S275JR Flat/Long Products THK<=16mm 50'C
Rm=410 Rp=275 Rpt=275 f=170.83 f20=170.83 ftest=261.9 (N/mm2)
NOTE: A PARTICULAR MATERIAL APPRAISAL(PMA) MAY BE REQUIRED FOR THIS MATERIAL.
TOTAL LENGTH OF THE CONE IN THE CENTERLINE DIRECTION:Lc 700.00 mm
MODULUS OF ELASTICITY at design temp.....:E 2,0966E05 N/mm2
SAFETY FACTOR (1.0 carbon and 1.25 austenitic steels):s 1.00
UNSUPPORTED LENGTH OF SHELL (Fig. 8.5-2).....:L 2540.00 mm
AS BUILT THICKNESS OF THE CONE.....:en 10.00 mm
NEGATIVE TOLERANCE/THINNING ALLOWANCE.....:th 1.00 mm
INSIDE DIAMETER AT LARGE BASE OF CONE(corroded).....:DiL 700.00 mm
INSIDE DIAMETER AT SMALL BASE OF CONE(corroded).....:DiS 500.00 mm
```

7.6.4 CONICAL SHELLS

```
Required Cone Thickness at Large Base Excl.Allow. emin :
emin = P * DiL / (2 * f * z - P) / Cos( alfa) (7.6-2)
=0.5*700/(2*170.83*0.85-0.5)/Cos(8.13)= 1.22 mm
Required Cone Thickness at Large Base Incl.Allow. emina :
emina = emin + c + th =1.22+0.5+1= 2.72 mm
```

»Cone Thk. emina=2.72 <= en=10[mm] « » (U= 27.2%) OK«

EN13445-5;10.2.3.3 REQUIRED MIN.HYDROSTATIC TEST PRESSURE:Ptmin

```
NEW AT AMBIENT TEMP. FOR TEST GROUPS 1, 2 and 3
Ptmin = 1.25 * Pd * 170.83 / 170.83
=1.25*0.5*170.83/170.83= 0.6250 MPa
```

Zadovoljen je uvjet da je proračunata debljina stijenke manja od izvedene:

$$e_{mina} (2,72 \text{ mm}) < e_n (10 \text{ mm})$$

7.4.5 Proračun cilindričnog plašta drugog stupnja

Uneseni proračunski parametri:

$D_e=1220$ mm	- vanjski promjer cilindričnog plašta
$L_{cy}=5600$ mm	- duljina cilindričnog plašta
$e_n=10$ mm	- debljina stijenke cilindričnog plašta
$\nu=0,85$	- koeficijent zavarenog spoja
$c=0,5$ mm	- dodatak za odstupanje dimenzija materijala
$t_h=1$ mm	- dodatak zbog smanjenja debljine lima korozijom i habanjem

GENERAL DESIGN DATA

PRESSURE LOADING: Design Component for Internal and External Pressure
PROCESS CARD: Shell Side : Temp= 104°C, P= .5MPa, c= .5mm, Pext= .1MPa

SHELL DATA

CYLINDER FABRICATION: Welded Pipe
WELD JOINT COEFFICIENT: Testing Group 3 (z=0.85)
EN 10025-2:2005, 1.0044 S275JR Flat/Long Products THK≤16mm 50'C
Rm=410 Rp=275 Rpt=275 f=170.83 f20=170.83 ftest=261.9 (N/mm2)
NOTE: A PARTICULAR MATERIAL APPRAISAL(PMA) MAY BE REQUIRED FOR THIS MATERIAL.
OUTSIDE DIAMETER OF SHELL.....:De 1220.00 mm
LENGTH OF CYLINDRICAL PART OF SHELL.....:Lcyl 5600.00 mm
MODULUS OF ELASTICITY at design temp.....:E 2,0966E05 N/mm2
SAFETY FACTOR (1.0 carbon and 1.25 austenitic steels):s 1.00
AS BUILT WALL THICKNESS (uncorroded).....:en 10.00 mm
NEGATIVE TOLERANCE/THINNING ALLOWANCE.....:th 1.00 mm
Split shell into several shell courses and include welding information: NO

7.4.2 - CYLINDRICAL SHELLS UNDER INTERNAL PRESSURE

Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. e_{min} :
$$e_{min} = D_e * P / (2 * f * z + P)$$

$$= 1220 * 0.5 / (2 * 170.83 * 0.85 + 0.5) =$$
 (7.4-2)
2.10 mm

Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :
$$e_{min} = e_{min} + c + t_h = 2.1 + 0.5 + 1 =$$
 3.60 mm

Analysis Thickness
$$e_a = e_n - c - t_h = 10 - 0.5 - 1 =$$
 8.50 mm

»7.4.1 Cond.of Applicabilty $e_{min}/D_e=0.0017 \leq 0.16$ » OK«

»Internal Pressure $e_{min}=3.6 \leq e_n=10[\text{mm}]$ » (U= 35.9%) OK«

EN13445-5;10.2.3.3 REQUIRED MIN.HYDROSTATIC TEST PRESSURE: P_{tmin}

NEW AT AMBIENT TEMP. FOR TEST GROUPS 1, 2 and 3

$$P_{tmin} = 1.25 * P_d * 170.83 / 170.83$$

$$= 1.25 * 0.5 * 170.83 / 170.83 =$$
 0.6250 MPa

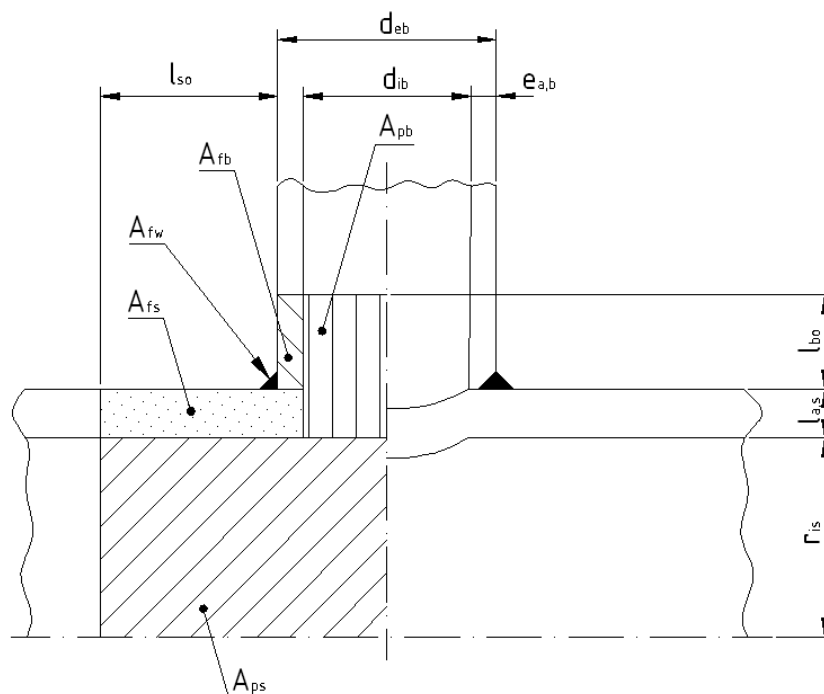
Zadovoljen je uvjet da je proračunata debljina stijenke manja od izvedene:

$$e_{min} (3,60 \text{ mm}) < e_n (10 \text{ mm})$$

7.4.6 Proračun najvećeg izreza cilindričnog plašta drugog stupnja

Uneseni proračunski parametri:

$d_{eb}=508$ mm - vanjski promjer priključka
 $e_{nb}=11$ mm - debljina stijenke priključka



Slika 8. Otvor na cilindričnom plaštu drugog stupnja

NOZZLE DIMENSIONAL DATA

OUTSIDE NOZZLE DIAMETER.....:deb 508.00 mm
 AS BUILT NOZZLE THICKNESS (uncorroded).....:enb 11.00 mm

9.5.2.4.4 Nozzles normal to the shell, with or without reinforcement pads.

Calculation of Stress Loaded Areas Effective as Reinforcement

Area of Shell Afs

Limit of Reinforcement Along Shell

$$I_{so} = \sqrt{(2 * r_{is} + e_{as}) * e_{as}}$$

$$= \sqrt{(2 * 601.5 + 8.5) * 8.5} =$$

101.48 mm

Set In Nozzle

$$A_{fs} = e_{as} * I_{so} \quad (9.5-78) = 8.5 * 101.48 =$$

862.56 mm²

Area of Nozzle Afb

Limit of Reinforcement Along Nozzle (outside shell)

$$I_{bo} = \min(\sqrt{(d_{eb} - e_b) * e_b}, h_o) \quad (9.5-75)$$

$$= \min(\sqrt{(508 - 10.5) * 10.5}, 300) =$$

72.28 mm

Set In Nozzle

$$A_{fb} = e_b * (I_{bo} + I_{bi} + e_{as}) \quad (9.5-77) = 10.5 * (72.28 + 0 + 8.5) =$$

848.14 mm²

Calculation of Pressure Loaded Areas

In the Nozzle A_{pb}

$$A_{pb} = 0.5 * d_{ib} * (I_{bo} + e_{as}) \quad (9.5-83) = 0.5 * 487 * (72.28 + 8.5) = \underline{19668.84 \text{ mm}^2}$$

Cyl.Shell in the Longitudinal Section A_{ps}

$$A_{psL} = r_{is} * (I_s + a) \quad (9.5-93) = 601.5 * (101.48 + 254) = \underline{2,1382E05 \text{ mm}^2}$$

Cyl.Shell in the Transverse Cross Section A_{ps}

$$A_{psT} = 0.5 * r_{is}^2 * (I_s + a) / (0.5 * e_{as} + r_{is}) \quad (9.5-104) \\ = 0.5 * 601.5^2 * (101.48 + 262.1) / (0.5 * 8.5 + 601.5) = \underline{1,0858E05 \text{ mm}^2}$$

$$A_{ps} = \text{MAX}(A_{psL}, A_{psT}) = \text{MAX}(2,1382E05, 1,0858E05) = \underline{2,1382E05 \text{ mm}^2}$$

9.5.2 Reinforcement Rules

Pressure Area Required $pA(\text{req.})$

$$pA_{\text{reqL}} = P * (A_{psL} + A_{pb}) \quad (9.5-7) = 0.5 * (2,1382E05 + 19668.84) = \underline{116.74 \text{ kN}}$$

$$pA_{\text{reqT}} = P * (A_{psT} + A_{pb} + 0.5 * A_{p\phi i}) \quad (9.5-7) \\ = 0.5 * (1,0858E05 + 19668.84 + 0.5 * 0) = \underline{64.12 \text{ kN}}$$

$$pA_{\text{req}} = \text{MAX}(pA_{\text{reqL}}, pA_{\text{reqT}}) = \text{MAX}(116.74, 64.12) = \underline{\underline{116.74 \text{ kN}}}$$

Pressure Area Available $pA(\text{aval.})$

$$pA_{\text{aval}} = (A_{fs} + A_{fw}) * (f_s - 0.5 * P) + A_{fp} * (f_{op} - 0.5 * P) + A_{fb} * (f_{ob} - 0.5 * P) \quad (9.5-7) \\ = (862.56 + 0) * (170.83 - 0.5 * 0.5) + 0 * (0 - 0.5 * 0.5) + 848.14 * (170.83 - 0.5 * 0.5) = \underline{\underline{291.81 \text{ kN}}}$$

»Nozzle Reinforcement $pA_{\text{aval}} = 291.81 \geq pA_{\text{req}} = 116.74 [\text{kN}]$ « » (U= 40%) OK«

7.4.7 Proračun cilindričnog plašta podnice drugog stupnja

Uneseni proračunski parametri:

$D_e=1220$ mm	- vanjski promjer cilindričnog plašta
$L_{cyl}=300$ mm	- duljina cilindričnog plašta
$e_n=10$ mm	- debljina stijenke cilindričnog plašta
$\nu=0,85$	- koeficijent zavarenog spoja
$c=0,5$ mm	- dodatak za odstupanje dimenzija materijala
$t_h=1$ mm	- dodatak zbog smanjenja debljine lima korozijom i habanjem

GENERAL DESIGN DATA

PRESSURE LOADING: Design Component for Internal and External Pressure
PROCESS CARD: Shell Side : Temp= 104°C, P= .5MPa, c= .5mm, Pext= .1MPa

SHELL DATA

CYLINDER FABRICATION: Welded Pipe
WELD JOINT COEFFICIENT: Testing Group 3 (z=0.85)
EN 10025-2:2005, 1.0044 S275JR Flat/Long Products THK<=16mm 50'C
Rm=410 Rp=275 Rpt=275 f=170.83 f20=170.83 ftest=261.9 (N/mm2)
NOTE: A PARTICULAR MATERIAL APPRAISAL(PMA) MAY BE REQUIRED FOR THIS MATERIAL.
OUTSIDE DIAMETER OF SHELL.....:De 1220.00 mm
LENGTH OF CYLINDRICAL PART OF SHELL.....:Lcyl 300.00 mm
MODULUS OF ELASTICITY at design temp.....:E 2,0966E05 N/mm2
SAFETY FACTOR (1.0 carbon and 1.25 austenitic steels):s 1.00
AS BUILT WALL THICKNESS (uncorroded).....:en 10.00 mm
NEGATIVE TOLERANCE/THINNING ALLOWANCE.....:th 1.00 mm
Split shell into several shell courses and include welding information: NO

7.4.2 - CYLINDRICAL SHELLS UNDER INTERNAL PRESSURE

Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. e_{min} :

$$e_{min} = D_e * P / (2 * f * z + P) \quad (7.4-2)$$

$$= 1220 * 0.5 / (2 * 170.83 * 0.85 + 0.5) = 2.10 \text{ mm}$$
 Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :

$$e_{mina} = e_{min} + c + t_h = 2.1 + 0.5 + 1 = 3.60 \text{ mm}$$
 Analysis Thickness

$$e_a = e_n - c - t_h = 10 - 0.5 - 1 = 8.50 \text{ mm}$$

»7.4.1 Cond.of Applicabilty $e_{min}/D_e=0.0017 \leq 0.16$ » OK«
 »Internal Pressure $e_{mina}=3.6 \leq e_n=10[\text{mm}]$ » (U= 35.9%) OK«

EN13445-5;10.2.3.3 REQUIRED MIN.HYDROSTATIC TEST PRESSURE: P_{tmin}

NEW AT AMBIENT TEMP. FOR TEST GROUPS 1, 2 and 3

$$P_{tmin} = 1.25 * P_d * 170.83 / 170.83$$

$$= 1.25 * 0.5 * 170.83 / 170.83 = 0.6250 \text{ MPa}$$

Zadovoljen je uvjet da je proračunata debljina stijenke manja od izvedene:

$$e_{mina} (3,60 \text{ mm}) < e_n (10 \text{ mm})$$

7.4.8 Proračun ravne podnice

Uneseni proračunski parametri:

$$e_n = 25 \text{ mm}$$

- debljina stijenke ravne podnice

DATA FOR END/BLIND FLANGE

AS BUILT THICKNESS OF HEAD/END (uncorroded):en 25.00 mm

10.4.4 MINIMUM THICKNESS OF FLAT END e

```

emin1 = C1 * Di * Sqr( P / f)                                     (10.4-10)
=0.3843*1201*Sqr(0.5/170.83)=                                   24.97 mm
emin2 = C2 * Di * Sqr( P / fmin)                                 (10.4-10)
=0.4958*1201*Sqr(0.5/170.83)=                                   32.22 mm
NOTE: The design may be based on emin1 only, provided a simplified assessment
of the fatigue life of the flat end to shell junction is performed according to
section 17 using etta=                                           = 2.33 (ref. 10.4.4.4).
Minimum thickness excluding corrosion emin
emin = MAX( emin1 , emin2 ) =MAX(24.97,32.22)=                 32.22 mm
Minimum thickness including corrosion e
e = emin + c =32.22+0.5=                                         32.72 mm

```

»Thickness Check $e_n=25 \geq e=32.72$ «

» (U= 130.8%) NOT OK«

Nije zadovoljen uvjet da je proračunata debljina stijenke manja od izvedene: e (32,72 mm) < e_n (25 mm), što je posljedica toga da se u programu može definirati samo podnica iz jednog komada, dok je u stvarnosti ona izvedena od dva dijela.

7.4.9 Proračun najvećeg izreza na ravnoj podnici

Uneseni proračunski parametri:

$d_{eb}=159$ mm	- vanjski promjer priključka
$e_{nb}=4,5$ mm	- debljina stijenke priključka

NOZZLE DIMENSIONAL DATA

```

OUTSIDE NOZZLE DIAMETER.....:deb      159.00 mm
AS BUILT NOZZLE THICKNESS (uncorroded).....:enb      4.50 mm

```

Required Minimum Thickness of End due to Opening e_{min}

```

emin = MAX( Y1 * eo, C1 * Y2 * Di * SQR( P / fs)) + c      (10.6-1)
=MAX(1.16*32.22,0.3843*1.07*1201*SQR(0.5/170.83))+0.5=      37.91 mm
»Req.Unpierced End Thk. emin=37.91 <= en=25[mm] «      » (U= 151.6%) NOT OK«

```

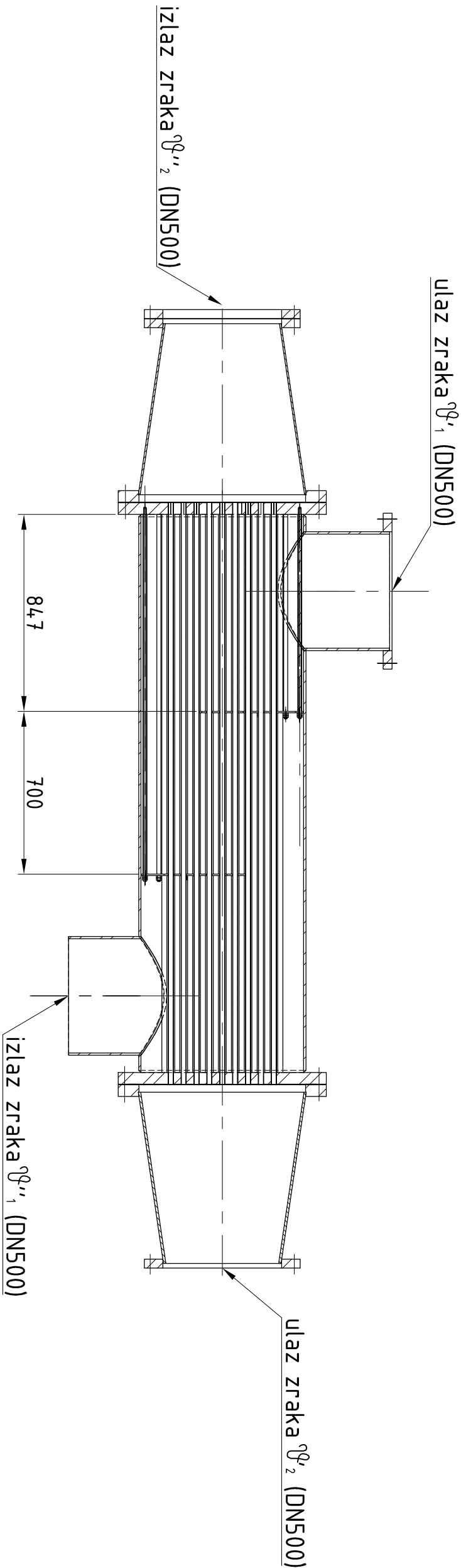
Kao i kod proračuna ravne podnice, zbog geometrijskog definiranja koje ne odgovara izvedenom stanju, i kod proračuna najvećeg izreza nije zadovoljen uvjet da je proračunata debljina stijenke manja od izvedene: e (37,91 mm) < e_n (25 mm).

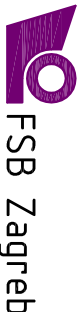
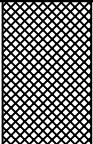
8 Zaključak

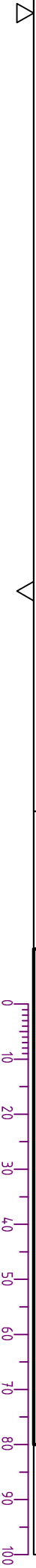
S obzirom na konstrukciju i zadane ulazne parametre izračunati su slijedeći učini: 387,75 kW za izmjenjivač zrak-zrak i 1163,84 kW za izmjenjivač zrak-voda. Pad tlaka na strani vode iznosi 1063,2 Pa, dok na strani zraka iznosi: 12309,45 Pa za izmjenjivač zrak-zrak i 6481,89 Pa za izmjenjivač zrak-voda. Pad tlaka zraka u izmjenjivaču zrak-zrak je skoro duplo veći od pada tlaka zraku u izmjenjivaču zrak-voda s obzirom da u izmjenjivaču prvog stupnja zrak prolazi i kroz cijevi i kroz plašt izmjenjivača. Prema tome, ukupni pad tlaka zraka je 18791,34 Pa (0,19 bar). S obzirom na nominalni radni tlak od 4,2 bar, kolebanje tlaka od 0,19 bar (4,5%) je prihvatljivo. Svi konstrukcijski dijelovi čija čvrstoća je proračunata u „Visual Vessel Designu“ zadovoljavaju potrebnu debljinu stijenke, osim podnice koju nije moguće ispravno geometrijski definirati.

9 Literatura

- [1] Slipčević B.; *Razmjenjivači topline sa primjerima iz rashladne tehnike*; 1989.
- [2] Galović A.; *Termodinamika II*; 2003.
- [3] FSB; *Toplinske tablice*
- [4] Malinovec Puček M.; *Proračun pada tlaka kod shell and tube izmjenjivača*;
<http://www.fsb.hr/termolab/nastava/Proracun%20pada%20tlaka-v10.pdf>
- [5] Visual Vessel Design - software
- [6] <http://www.znksteel.com>
- [7] Stahlschussel – software
- [8] Narodne novine; *Pravilnik o tlačnoj opremi*; br.20/2010



						
	Datum	Ime i prezime	Potpis			
Projektirao						
Razradio						
Crtao	02.11.10.	Tomislav Đurak				
Pregledao	02.11.10.	Ivanka Boras				
Objekt:				Objekt broj:		
Napomena:				R. N. broj:		
				Kopija		
Materijal:		Masa:				
Naziv:		Pozicija:				
Mjerilo originala		Smještaj pregrada I. stupnaja				
1:20		Crtež broj: DR-TD-001		List: 1		



1

2

3

4

5

6

7

8

A

B

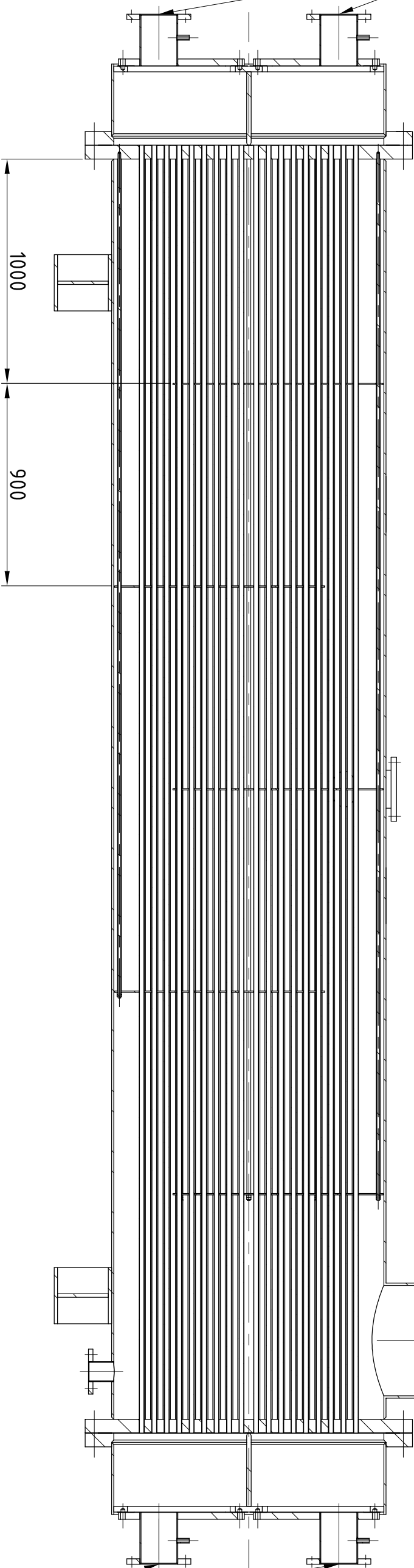
C

D

E


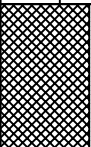

F

izlaz vode ϑ''_4 (DN150)

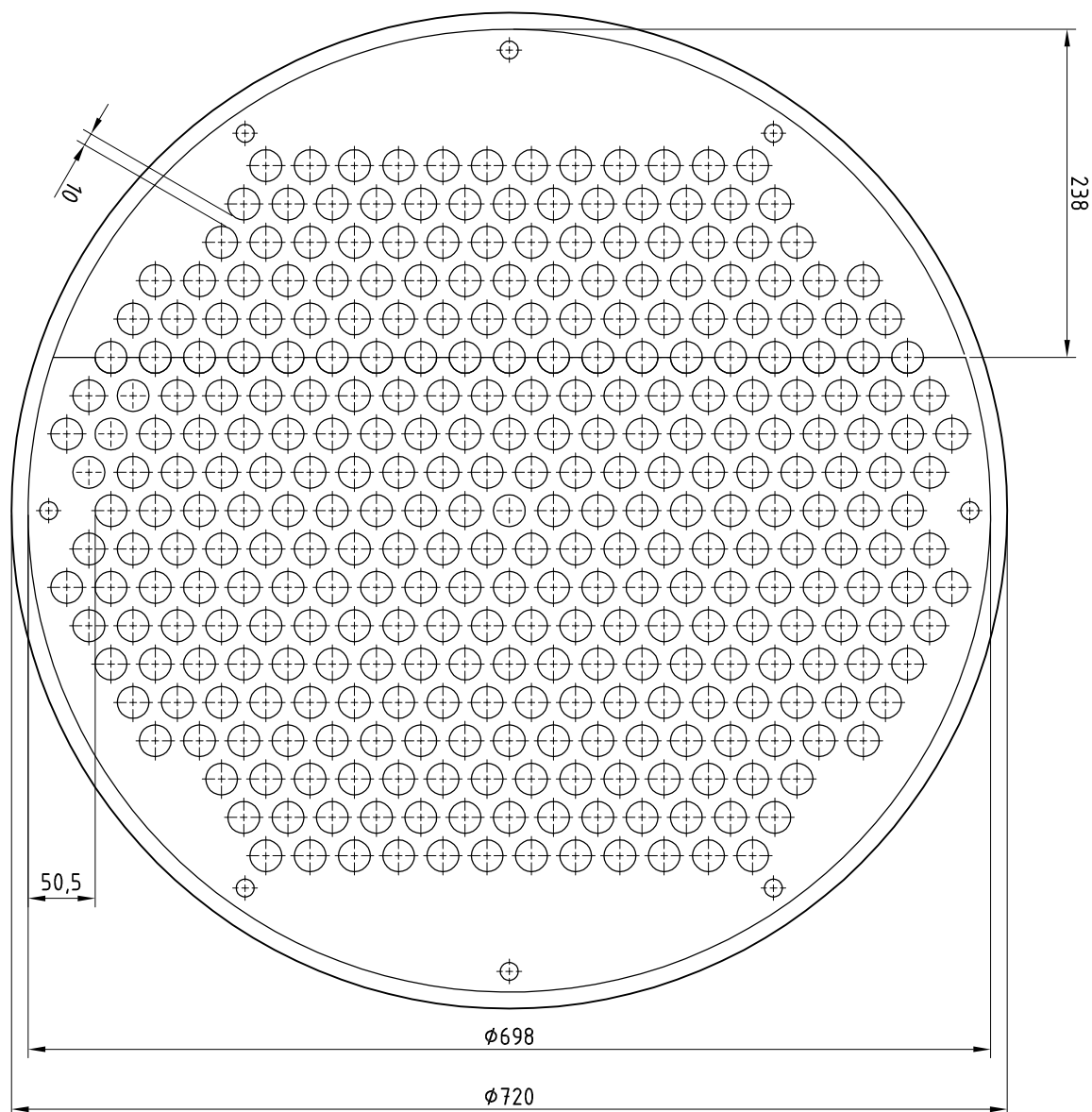





izlaz zraka ϑ''_3 (DN500)

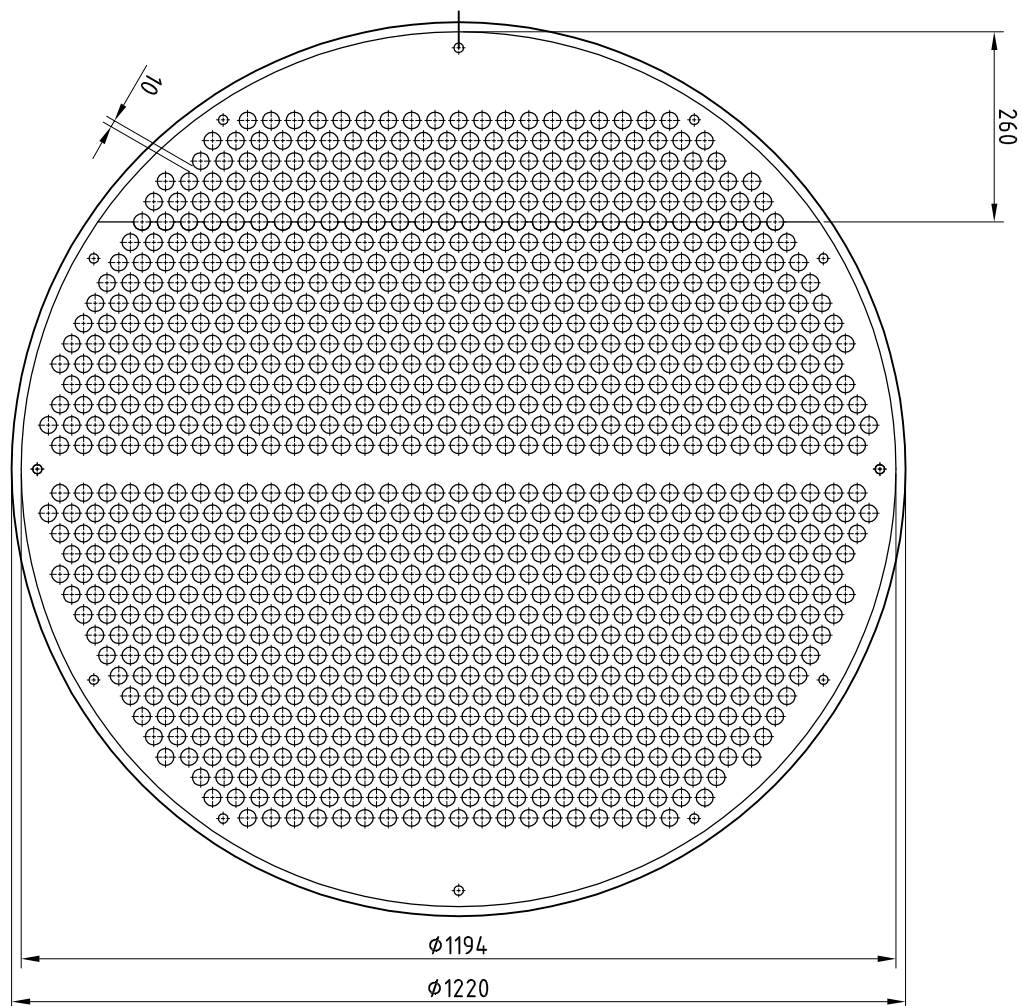
ulaz vode ϑ'_4 (DN150)



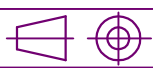
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis		
Razradio					
Crtao	02.11.10.	Tomislav Đurak			
Pregledao	02.11.10.	Ivanka Boras			
Objekt:		Objekt broj:			
Napomena:		R. N. broj:		Kopija	
Materijal:	Masa:				
	Naziv:		Pozicija:		Format: A3
Mjerilo originala	Smještaj pregrada II. stupnja				Listova: 6
1:20	Crtež broj: DR-TD-002				List: 2

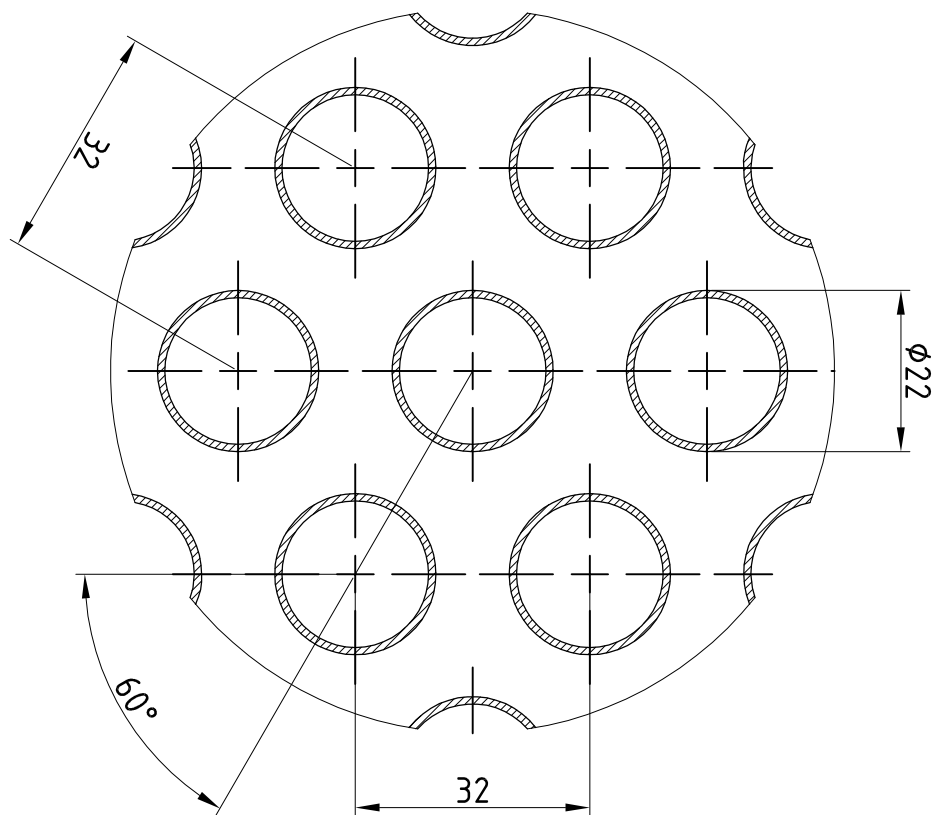






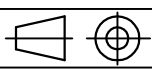
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao				
Razradio				
Crtao	02.11.10.	Tomislav Đurak		
Pregledao	02.11.10.	Ivanka Boras		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal:			Masa:	
 Mjerilo originala 1:5	Naziv: Pregrada I. stupnaja		Pozicija: 	Format: A4 Listova: 6 List: 3
Crtež broj: DR-TĐ-003				

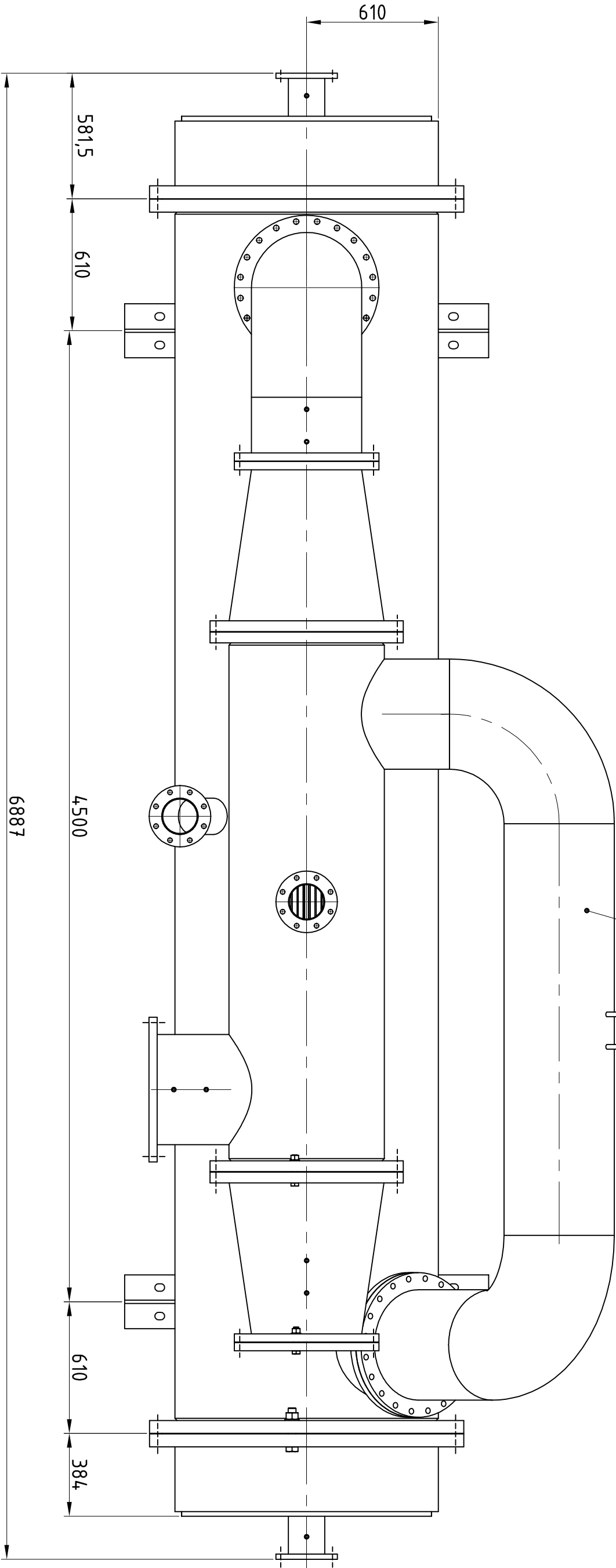
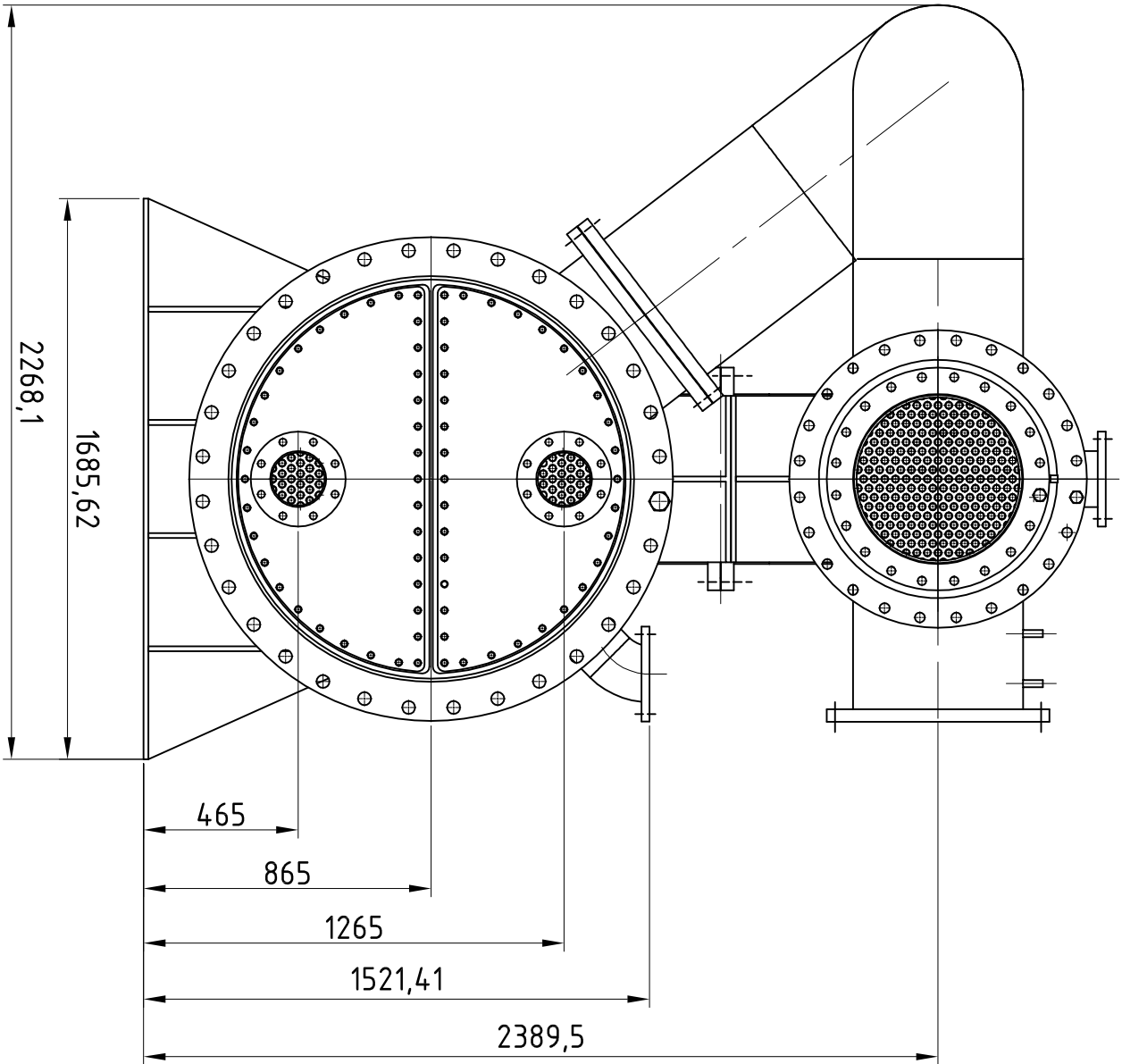
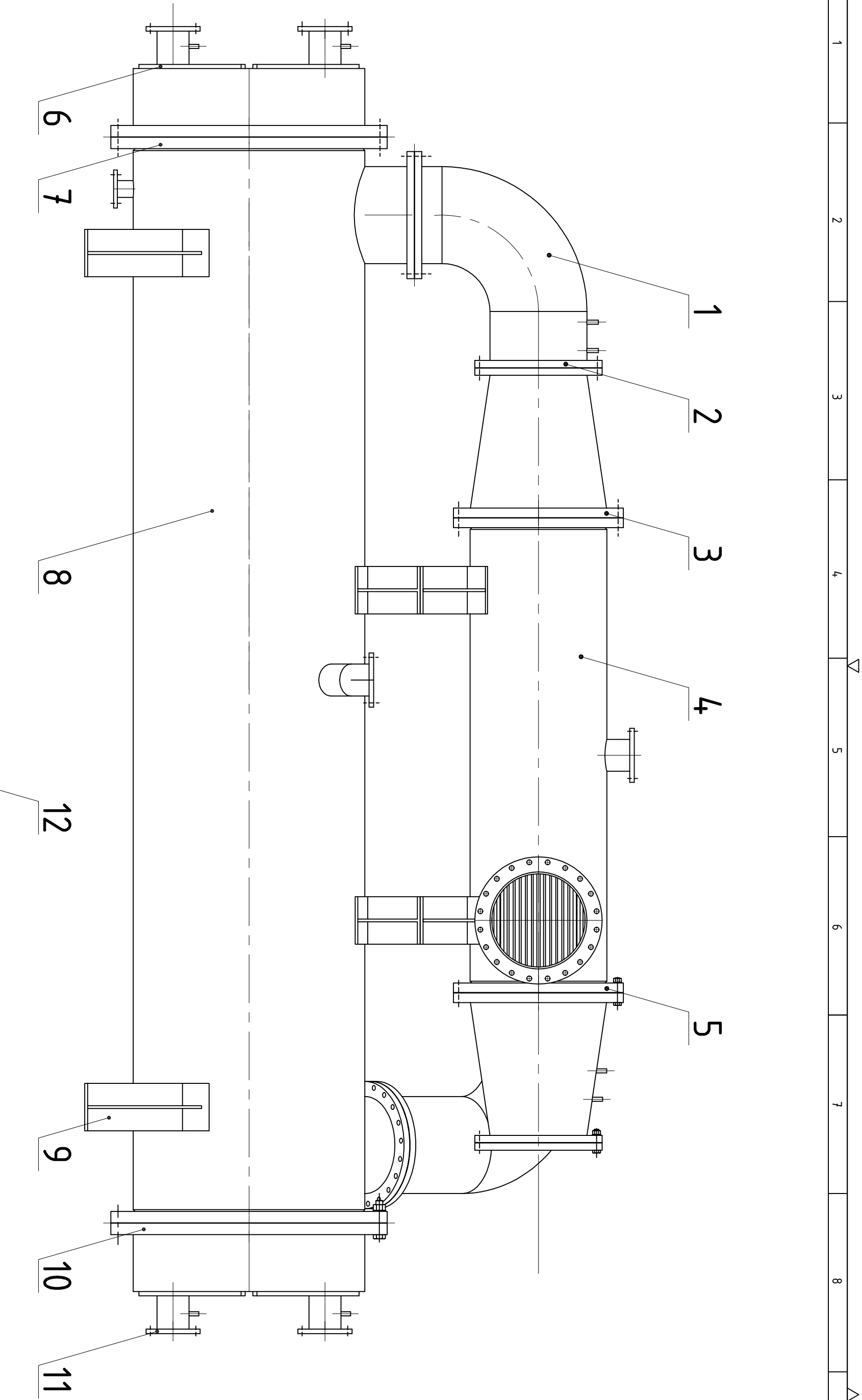


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao				
Razradio				
Crtao	02.11.10.	Tomislav Đurak		
Pregledao	02.11.10.	Ivanka Boras		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
				
Materijal:		Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Pregrada II. stupnaj			Listova: 6
1:10	Crtež broj: DR-TĐ-004			List: 4



smjer nastrujavanja zraka

	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao				
Razradio				
Crtao	02.11.10.	Tomislav Đurak		
Pregledao	02.11.10.	Ivanka Boras		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
				
Materijal:		Masa:		
 Mjerilo originala 1:1	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	Šahovski smještaj cijevi			Listova: 6
	Crtež broj: DR-TĐ-005			List: 5



12	Spojna cijev	1	DIN 2460	St 37.0	ø508x11x1910
11	Prirubnica	4	DIN 2501 T1/72	S235JRG2	DN 150, PN 10
10	Prirubnica	2	DIN 2501 T1/72	S235JRG2	DN 1200, PN 10
9	Strak	2	HRN EN 10025	S275JR	650x250x1685
8	Plasť drugog stupnja	1	HRN EN 10025	S275JR	ø1220x5600
7	Cijevna stijenka drugog stupnja	2	HRN EN 10025	S275JR	ø1455x60
6	Poklopac s prklijužkom	4	HRN EN 10025	S275JR	ø1160x560
5	Cijevna stijenka prvog stupnja	2	HRN EN 10025	S275JR	ø895x50
4	Plasť prvog stupnja	1	HRN EN 10025	S275JR	ø720x2400
3	Prirubnica	2	DIN 2501 T1/72	S235JRG2	DN 700, PN 10
2	Prirubnica	4	DIN 2501 T1/72	S235JRG2	DN 500, PN 10
1	Koljeno	3	DIN 2501 T1/72	St 37.0	ø508x11x90°
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj	Materijal	Sirove dimenzije
			Norma		Proizvođač
					Masa
Broj naziva - code					
	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio				
	Crtao	02.11.10.	Tomislav Đurak		
	Pregledao	02.11.10.	Ivanka Boras		
	Mentor				
ISO - tolerancije					
Objekt:					
Objekt broj:					
R. N. broj:					
Napomena:					
Smjer: PE - Termotehnika					
Materijal:					
Masa:					
Naziv:					
DIPLOMSKI RAD					
Pozicija:					
Format: A2					
Mjerilo originala					
Listova: 6					
Crtež broj: DR-TD-006					
List: 6					